

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Umweltwissenschaften

**Untersuchungen zur Qualität und Genauigkeit von
3D-Punktwolken für die 3D-Objektmodellierung auf der
Grundlage von terrestrischem Laserscanning und
bildbasierten Verfahren**

DISSERTATION

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Prof. Dipl.-Ing. Thomas P. Kersten
geboren am 14. April 1960
in Hannover

Gutachter:

Prof. Dr. sc.-techn. habil. Hans-Gerd Maas
Technische Universität Dresden / Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Luhmann
Jade Hochschule Oldenburg / Institut für Angewandte Photogrammetrie und
Geoinformatik

Prof. Dr.-Ing. Knut Ragnar Holm (em.)
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet / Institutt for bygg- og miljøteknikk

Verteidigung: Dresden, 17.11.2017

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

**„Untersuchungen zur Qualität und Genauigkeit von 3D-Punktwolken
für die 3D-Objektmodellierung auf der Grundlage von terrestrischem Laserscanning
und bildbasierten Verfahren“**

wird hiermit bestätigt.

Hamburg, 17.11.2017

.....
Ort, Datum

Thomas P. Kersten

.....
Unterschrift (Vorname Name)

Kurzfassung

3D-Punktwolken haben die Objektvermessung in den letzten 25 Jahren signifikant verändert. Da Einzelpunktmessungen durch flächenhafte Messungen in Form von Punktwolken bei vielen Anwendungen ersetzt wurden, spricht man auch von einem Paradigmenwechsel in der Vermessung. Ermöglicht wurde diese Änderung in der Messmethodik durch die Innovationen im Instrumentenbau und die rasanten Entwicklungen der Computertechnologie. Luftgestützte und terrestrische Laserscanner sowie handgeführte 3D-Scanner liefern heute direkt dichte Punktwolken, während dichte 3D-Punktwolken aus Fotos bildbasierter Aufnahmesysteme indirekt abgeleitet werden, die zur detaillierten 3D-Objektrekonstruktion zunehmend eingesetzt werden.

In dieser Arbeit werden Untersuchungen vorgestellt, mit denen das geometrische Genauigkeitsverhalten verschiedener scannender Messsysteme evaluiert und geprüft wurde. Während bei den untersuchten terrestrischen Laserscannern in den Untersuchungen die Genauigkeitsangaben (1 Sigma) der technischen Spezifikationen der Systemhersteller von 3-5 mm für den 3D-Punkt und die Distanzmessung eingehalten wurden, zeigten sich dagegen bei vielen untersuchten 3D-Handscannern signifikante Abweichungen gegenüber den technischen Spezifikationen. Diese festgestellten Abweichungen deuten auf eine gewisse geometrische Instabilität des jeweiligen Messsystems hin, die entweder durch die Bauweise und/oder durch eine ungenaue Systemkalibrierung (besonders hinsichtlich der Maßstäblichkeit) verursacht werden. Daher ist davon auszugehen, dass diese handgeführten 3D-Scanner offensichtlich erst am Anfang ihrer Entwicklungsphase stehen und dass noch genügend Optimierungspotential vorhanden ist.

Als flexible und effiziente Alternativen zu den scannenden Messsystemen haben sich seit ca. 10 Jahren die bildbasierten Aufnahmesysteme zunehmend im Markt etabliert. Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen des bildbasierten Aufnahme- und Auswertungsverfahrens haben gezeigt, dass diese (mit Farbattributen versehene) 3D-Punktwolken, je nach Bildmaßstab und Oberflächenmaterial des Objektes, durchaus den Genauigkeiten der Laserscanner entsprechen. Gegenüber den Ergebnissen vieler 3D-Handscanner weisen die durch bildbasierte Aufnahmeverfahren generierten Punktwolken qualitativ bessere Resultate auf. Allerdings zeigte der Creaform HandySCAN 700, der auf einem photogrammetrischen Aufnahmeprinzip beruht, als einzige Ausnahme bei der handgeführten 3D-Scannern sehr gute Ergebnisse, die mit Durchschnittswerten besser als 30 Mikrometern sogar in den Bereichen der Referenzsysteme (hier Streifenprojektionssysteme) lagen.

Die entwickelten Prüfverfahren und die entsprechenden durchgeführten Untersuchungen haben sich als praxistauglich erwiesen, da man auch unter zur Hilfenahme der VDI/VDE Richtlinie 2634 vergleichbare Ergebnisse erzielt, die dem praxisorientierten Anwender Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Messsystems erlauben. Bei den im statischen Modus erfassten Scans kommen noch Fehlereinflüsse durch die Registrierung der Scans hinzu, während bei kinematisch erfassten Scans die Genauigkeiten der verschiedenen (absoluten) Positionierungssensoren auf dem Fehlerhaushalt der Punktwolke addiert werden. Eine sorgfältige Systemkalibrierung der verschiedenen im kinematischen Modus arbeitenden Positionierungs- und Aufnahmesensoren des mobilen Multi-Sensor-Systems ermöglicht eine 3D-Punktgenauigkeit von ca. 3-5 cm, die unter guten Bedingungen mit höherwertigen Sensoren ggf. noch verbessert werden kann. Mit statischen Scans kann eine höhere Genauigkeit von besser als 1 cm für den 3D-Punkt erreicht werden, jedoch sind bei größeren aufzunehmenden Flächen mobile Aufnahmesysteme wesentlich effizienter. Die Anwendung definiert daher das zum Einsatz kommende Messverfahren.

3D-Punktwolken dienen als Grundlage für die Objektrekonstruktion auf verschiedenen Wegen:

a) Engineering Modelling als generalisierte CAD-Konstruktion durch geometrische Primitive und
b) Mesh Modelling durch Dreiecksvermaschung der Punktwolken zur exakten Oberflächenbeschreibung. Durch die Generalisierung bei der CAD-Konstruktion können sehr schnell Abweichungen vom Sollmaß von bis zu 10 cm (und größer) entstehen, allerdings werden durch die Anpassung auf geometrische Primitive eine signifikante Datenreduktion und eine topologische Strukturierung erreicht. Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass die Anzahl der Polygone bei der Dreiecksvermaschung je nach Oberflächenbeschaffenheit des Objektes auf 25% und sogar auf 10% der Originaldatenmenge bei intelligenter Ausdünnung (z.B. krümmungsbasiert) reduziert werden kann, ohne die visuelle und geometrische Qualität des Ergebnisses zu stark zu beeinträchtigen. Je nach Objektgröße können hier Abweichungen von unter einem Millimeter (z.B. bei archäologischen Fundstücken) bis zu 5 cm im Durchschnitt bei größeren Objekten erreicht werden. Heute können Punktwolken eine wichtige Grundlage zur Konstruktion der Umgebung für viele Virtual Reality Anwendungen bilden, bei denen die geometrische Genauigkeit der modellierten Objekte im Einzelfall keine herausragende Rolle spielt.

Abstract

3D point clouds have significantly changed the surveying of objects in the last 25 years. Since in many applications, the individual point measurements were replaced through area-based measurements in form of point clouds, a paradigm shift in surveying has been fulfilled. This change in measurement methodology was made possible with the rapid developments in instrument manufacturing and computer technology. Today, airborne and terrestrial laser scanners, as well as hand-held 3D scanners directly generate dense point clouds, while dense point clouds are indirectly derived from photos of image-based recording systems used for detailed 3D object reconstruction in almost any scale.

In this work, investigations into the geometric accuracy of some of these scanning systems are presented to document and evaluate their performance. While terrestrial laser scanners mostly met the accuracy specifications in the investigations, 3-5 mm for 3D points and distance measurements as defined in the technical specifications of the system manufacturer, significant differences are shown, however, by many tested hand-held 3D scanners. These observed deviations indicate a certain geometric instability of the measuring system, caused either by the construction/manufacturing and/or insufficient calibration (particularly with regard to the scale). It is apparent that most of the hand-held 3D scanners are at the beginning of the technical development, which still offers potential for optimization.

The image-based recording systems have been increasingly accepted by the market as flexible and efficient alternatives to laser scanning systems for about ten years. The research of image-based recording and evaluation methods presented in this work has shown that these coloured 3D point clouds correspond to the accuracy of the laser scanner depending on the image scale and surface material of the object. Compared with the results of most hand-held 3D scanners, point clouds generated by image-based recording techniques exhibit superior quality. However, the Creaform HandySCAN 700, based on a photogrammetric recording principle (stereo photogrammetry), shows as the solitary exception of the hand-held 3D scanners very good results with better than 30 micrometres on average, representing accuracies even in the range of the reference systems (here structured light projection systems).

The developed test procedures and the corresponding investigations have been practically proven for both terrestrial and hand-held 3D scanners, since comparable results can be obtained using the VDI/VDE guidelines 2634, which allows statements about the performance of the tested scanning system for practice-oriented users. For object scans comprised of multiple single scan acquired in static mode, errors of the scan registration have to be added, while for scans collected in the kinematic mode the accuracies of the (absolute) position sensors will be added on the error budget of the point cloud. A careful system calibration of various positioning and recording sensors of the mobile multi-sensor system used in kinematic mode allows a 3D point accuracy of about 3-5 cm, which if necessary can be improved with higher quality sensors under good conditions. With static scans an accuracy of better than 1 cm for 3D points can be achieved surpassing the potential of mobile recording systems, which are economically much more efficient if larger areas have to be scanned.

The 3D point clouds are the basis for object reconstruction in two different ways: a) engineering modelling as generalized CAD construction through geometric primitives and b) mesh modelling by triangulation of the point clouds for the exact representation of the surface. Deviations up to 10 cm (and possibly higher) from the nominal value can be created very quickly through the generalization in the CAD construction, but on the other side a significant reduction of data and a topological structuring can be achieved by fitting the point cloud into geometric primitives. However, investigations have shown that the number of polygons can be reduced to 25% and even 10% of the original data in the mesh triangulation using intelligent polygon decimation algorithms (e.g. curvature based) depending on the surface characteristic of the object, without having too much impact on the visual and geometric quality of the result. Depending on the object size, deviations of less than one millimetre (e.g. for archaeological finds) up to 5 cm on average for larger objects can be achieved. In the future point clouds can form an important basis for the construction of the environment for many virtual reality applications, where the visual appearance is more important than the perfect geometric accuracy of the modelled objects.

Inhaltsverzeichnis

<i>Erklärung</i>	<i>I</i>
<i>Kurzfassung.....</i>	<i>II</i>
<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>V</i>
1. Einführung	1
1.1. Struktur der Arbeit	2
1.2. Punktwolken durch scannende Systeme	4
1.2.1. Technische Spezifikationen terrestrischer Laserscanner.....	4
1.2.2. Untersuchungen terrestrischer Laserscanner.....	6
1.2.3. Untersuchungen handgeführter 3D-Scanner	9
1.3. Geometrische Objektmodellierung auf Basis von Punktwolken statischer Scans	10
1.3.1. Automation in der geometrischen Objektmodellierung auf Basis von Punktwolken.....	11
1.3.2. Engineering Modelling – Objektrekonstruktion mithilfe geometrischer Primitive im CAD.....	12
1.3.3. Mesh Modelling – Objektrekonstruktion durch Dreiecksvermaschung	17
1.4. Geometrische Objektmodellierung auf Basis von Punktwolken kinematischer Scans	18
1.5. Punktwolken durch photogrammetrische Verfahren	22
2. Genauigkeitsuntersuchungen.....	25
2.1. Terrestrische Laserscanner	25
1. Introduction.....	26
2. The terrestrial laser scanning systems used.....	27
3. Geometric investigations	29
4. Conclusions and outlook	38
2.2. Handgeführte 3D-Scanner	41
1. Introduction.....	42
2. Reference Bodies.....	43
3. Tested Handheld 3D Scanning Systems.....	43
4. Data acquisition.....	45
5. Evaluation and results	46
6. Conclusion and outlook.....	50

3. Objektmodellierung auf Basis statischer Scans	55
3.1. Objektmodellierung durch CAD.....	55
1. Introduction.....	58
2. The recorded object – northern sluice of the ancient dam in Marib/Yemen.....	60
3. Systems used for object recording.....	61
4. Photogrammetric object recording and laser scanning.....	61
5. Data Processing	63
6. Time and cost aspects	68
7. Conclusion and outlook.....	70
3.2. Objektmodellierung durch Dreiecksvermaschung.....	72
1. Introduction.....	74
2. System Used for Object Recording.....	74
3. The Scanned Objects – Moai of Easter Island.....	76
4. Object Recording.....	77
5. Data Processing and Modelling	80
6. Conclusion and outlook.....	83
4. Objektmodellierung auf Basis kinematischer Scans	85
4.1. Landbasiertes kinematisches Scanning.....	85
1. Introduction.....	86
2. The Istanbul Historic Peninsula Project	88
3. Systems Used for Data Acquisition.....	90
4. Data Acquisition by Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry.....	90
5. Mapping of Façades.....	94
6. Roof Mapping	97
7. 3D Modelling of City Model and Landmarks	99
8. Conclusion and Outlook	100

4.2. Wasserbasiertes kinematisches Scanning (Bonus-Artikel).....	103
1. Einführung	104
2. Mobile Multi-Sensor-Systeme	105
3. Sensorintegration des terrestrischen Scanners Riegl VZ-400.....	105
4. Systemkalibrierung.....	106
5. Genauigkeitsuntersuchungen	107
6. Anwendungsbeispiele	108
7. Fazit & Ausblick.....	109
8. Literatur	109
5. Alternative Verfahren für die Generierung von Punktwolken	111
1. Introduction.....	112
2. Applied Software	113
2.1. Bundler/PMVS2.....	113
2.2. VisualSFM	114
2.3. Microsoft Photosynth.....	114
2.4. Autodesk Photofly/123D Catch Beta.....	114
3. Workflow.....	115
4. Results & 3D Comparisons	115
4.1. Applications in Architecture	116
4.2. Applications in Cultural Heritage	118
4.3. Applications in Archaeology	119
5. Conclusion and Outlook	123
6. Fazit und Ausblick.....	126
7. Literatur.....	135

1. Einleitung

Seit der Einführung von flugzeuggetragenen Laserscanningsystemen Ende der achtziger und zu Beginn der neunziger Jahre des vorherigen Jahrhunderts haben sich in der Vermessung einschneidende Veränderungen vollzogen, da man sich nicht mehr auf eine punktweise Auswertung von Vermessungsdaten beschränken muss, sondern die Objekte flächenhaft durch 3D-Punktwolken erfassen und auswerten kann. Erfolgte bis dahin die Vermessung mit Tachymetern durch Auswahl und Messung repräsentativer Punkte am Objekt und die anschließende Modellierung durch Knoten und Kanten mit dem Ergebnis eines Drahtgittermodells, so erfasste der Scanner zufällige Punkte (Raster) in Form von nicht repräsentativen Punkten (Wolke) als große Punktmenge. So war die Punktauswahl und Modellbildung vor Ort nicht möglich, da erst im Nachgang der Aufnahme (Scanning) über die Auswertestrategie und Modellbildung sich Gedanken gemacht wurde.

Bereits Mitte der 1990er Jahre sieht Ackermann (1995) die digitale Photogrammetrie als einen Paradigmen-Sprung in der Photogrammetrie an, während Kraus (2003) später das Laserscanning als einen Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie betrachtet. Dieser Paradigmenwechsel „Vom Punkt zur Punktwolke“ ließ aber auch die Frage aufkommen „Punktwolken und was dann?“, die z.B. durch Fritsch (2015) gestellt und beantwortet wurde. Denn die Extraktion von Linien und Kanten aus Punktwolken zur Datenstrukturierung und -reduktion ist heute noch ein Forschungsthema. Erste Ansätze zur automatisierten Ableitung von Linien und Kanten mit Unterstützung von 3D-Punktwolken wurden ab Mitte der 1990er Jahre vorgestellt. In dem Projekt AMOBE der ETH Zürich wurden aus hochauflösenden digitalen Luftbildern digitale Oberflächenmodelle erstellt, die als Grundlage dienten, um automatisch Wohngebäude zu detektieren und als 3D-CAD-Modell zu rekonstruieren (Henricsson et al. 1996). In einem weiteren Ansatz stellen Läbe & Gülch (1998) die automatische Erstellung von Wohngebäuden mit Satteldächern durch Kantenextraktion in Luftbildern vor. Brenner & Haala (1998) präsentierten ein Verfahren, um mithilfe von Katasterdaten und Punktwolken, die durch airborne Laserscanning erstellt wurden, automatisch 3D-Gebäude als Constructive Solid Geometry (CSG) zu generieren und in eine Boundary Repräsentation umzuwandeln.

Airborne Laserscanningsysteme (ALS) haben sich ab ca. 1997 als kommerzielle Aufnahmesysteme im Markt zu etabliert. Als erster terrestrischer Laserscanner wurde der Callidus CP 3200 der Firma Callidus Precision System GmbH Ende der 1990er Jahre in Halle vorgestellt. Die internationale Markteinführung als kommerzielles Messsystem erfolgte dann im Jahr 2001. Es dauerte jedoch bis Mitte der 2000er Jahre, bis die terrestrischen Laserscanner (TLS) im Markt akzeptiert und für entsprechend vielseitige Anwendungen zunehmend eingesetzt wurden. Ab dem Jahr 2005 standen dann auch die ersten kommerziellen Systeme für das Mobile Mapping zur Verfügung. Diese Mobile Mapping Systeme hatten mindestens zwei terrestrische Laserscanner auf dem Dach eines Fahrzeugs montiert, deren Positionen und Orientierungen durch eine DGPS/IMU-Integration mit hoher Datenrate gemessen werden konnten (Fritsch 2014), so dass jeder vom Laserscanner erfasste Punkt im Raum mit einer entsprechenden Genauigkeit der Positionierungssensorik und ebenso der Laserscanner auch georeferenziert war.

Durch die kontinuierlichen technischen Entwicklungen hat das Laserscanning als primäre Erfassungsmethode für digitale Gelände- und Oberflächenmodelle der Photogrammetrie teilweise den Rang abgelaufen. Remondino et al. (2014) beschreiben die Entwicklung des Laserscannings im Vergleich zur Photogrammetrie in den 2000er Jahren wie folgt. Da sich die Hard- und Software in diesen Jahren aufgrund des technischen Fortschrittes kontinuierlich verbesserte, wurden die airborne und terrestrischen Laserscanningsysteme zunehmend in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt. Es zeigte sich, dass seit anderthalb Jahrzehnten die distanzbasierten Sensoren an Popularität zugenommen haben und heute noch als entscheidende Messsysteme für dichte Punktwolken zur 3D-

Dokumentation, für das Mapping und zur Visualisierung von Objekten in unterschiedlichen Maßstäben dienen. In diesem Zeitraum haben Laserscanningsysteme im Regelfall zeitweise Punktwolken mit höherer Punktdichte als die Photogrammetrie generiert. Erst im Jahre 2005 konnten aus Bilddaten ca. 100 Punkte/m² durch das Semi-Global-Matching (SGM) generiert werden (Hirschmüller, 2005), während durch ALS mit 10-20 Punkten/m² signifikant weniger erfasst wurden. Vorher wurde der Flaschenhals der Photogrammetrie durch die hohen technischen Anforderungen an photogrammetrische Operateure, durch intensive manuelle Datenverarbeitung und damit verbunden durch lange, ineffiziente Bearbeitungszeiten geprägt. Folglich haben sich die distanzbasierten Sensoren als führende Technologie für die detaillierte 3D-Aufnahme in den Vordergrund geschoben und die Photogrammetrie in vielen Aufgabenfeldern zeitweise verdrängt. Hinzu kam, dass viele Photogrammeter ihre Forschungsschwerpunkte in den Bereich des Laserscannings verlegten und somit Fortschritte und neue Entwicklungen in automatischen Verfahren mit photogrammetrischen Methoden eher unbewusst hemmten. Doch der Photogrammetrie kamen drei wichtige Entwicklungen zur Hilfe. Auf der einen Seite hat sich die Kamera-technologie durch höhere Auflösung und durch besseren dynamischen Umfang und Radiometrie erheblich verbessert. Andererseits wurden seit 2007 durch die Computer Vision im Bereich der Informatik wesentliche Algorithmen - hier sind in erster Linie das Verfahren Structure-from-Motion, das SGM und die innovativen Matching-Algorithmen (siehe Middlebury Stereo Evaluation unter <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval3/>) zu nennen – entwickelt, so dass die Photogrammetrie eine Wiederauferstehung als konkurrenzfähige Technologie erlebte und heute wieder einen höheren Stellenwert für automatisierte Prozesse einnimmt. Zudem halfen die Parallelisierung von Prozessen und die Portierung der Software von CPU auf die Graphic Processing Unit (GPU), die Auswertung signifikant zu beschleunigen. Während sich die Computer Vision vornehmlich um die Automation der Prozesse kümmert, liefert die Photogrammetrie als qualitätsorientierte Vermessungsmethode den metrischen Qualitätsaspekt in der Prozessierung automatisch erfasster Daten. So können durch bildbasierte Aufnahme bzw. Vermessung und durch entsprechende 3D-Modellierung in vernünftigen Zeitabständen Resultate mit vergleichbaren geometrischen Eigenschaften wie beim airborne und terrestrischem Laserscanning geliefert werden. Dadurch bietet der Markt, der vorher durch luftgestützte und terrestrische distanzbasierte Sensoren dominiert wurde, heute wieder mehr bildbasierte Messverfahren zur Aufnahme und 3D-Modellierung von komplexen Objekten mit 3D-Punktwolken an.

1.1. Struktur der Arbeit

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit ist eine kumulative Dissertation. Sie besteht aus einer Sammlung von sieben Publikationen, die in verschiedenen Fachzeitschriften publiziert und die alle einem zweifachen Begutachtungsverfahren (double blind PEER Review) unterzogen wurden. Der einzige auf Deutsch verfasste Artikel über die „Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser“ (Kap. 4.2.) wurde als „Bonusmaterial“ hinzugefügt, weil der Inhalt thematisch sehr gut in die vorliegende Arbeit passt und damit das Kap. 4.1. gut ergänzt. Die sieben zusammengestellten Fachartikel, die mit unterschiedlicher Formatierung in drei verschiedenen Journals veröffentlicht wurden, wurden in den Kapiteln 2-5 im Originalformat des jeweiligen Journals in diese Arbeit integriert. Dadurch konnte auf der einen Seite kein einheitliches und homogenes Layout für diese Arbeit realisiert werden, doch auf der anderen Seite steht jeder Fachartikel im Originallayout zur Verfügung. Die Unterkapitel in den jeweiligen Artikeln sowie die Nummerierung der Abbildungen und Tabellen wurden in jedem Fachartikel beibehalten. Der Literaturnachweis am Ende dieser Arbeit beinhaltet ausschließlich Referenzen, die in den Kapiteln 1 (Einleitung) und 6 (Fazit und Ausblick) verwendet wurden. Alle anderen Referenzen sind am Ende des jeweiligen Fachartikels aufgeführt.

Die folgenden Kapitel 2-5 enthalten jeweils einen bis zwei Fachartikel, die in dem jeweiligen Kapitel thematisch zusammenpassen, aber in ihrer Gesamtheit von Kapitel 2 zu Kapitel 5 fachlich einen roten Faden bilden. Für eine erfolgreiche und optimale Bearbeitung bzw. Auswertung von Punktwolken ist eine Kenntnis der Leistungsfähigkeit der scannenden Systeme essentiell. Daher sind in Kapitel 2 Genauigkeitsuntersuchungen von terrestrischen Laserscannern und der dazu komplementären handgeführten 3D Scanner aufgeführt. In Kapitel 3 zeigen die Artikel beispielhaft die Objektmodellierung auf der Grundlage von Punktwolken, die mit statischem TLS erfasst wurden, während in Kapitel 4 die Objektmodellierung mithilfe von kinematischen Scans jeweils von einem Fahrzeug und einem Schiff erfasst in zwei Fachbeiträgen diskutiert wird. Dass die Photogrammetrie mithilfe der Computer Vision durch die Generierung von Punktwolken mit bildbasierten Methoden seit ca. zehn Jahren dem Laserscanning zunehmend als konkurrenzfähige Technologie entgegentritt, wird in Kapitel 5 mit dem Fachartikel, der sich mit bildbasierten Systemen (Hardware, Kamera und Software) als Grundlage für alternative Verfahren zur Ableitung von Punktwolken befasst, aufgezeigt.

Die sieben Fachartikel für die kumulative Dissertation sind im Folgenden nach den entsprechenden Kapiteln sortiert zusammengestellt:

Kap. 2. Genauigkeitsuntersuchungen

Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H., 2009. Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. PFG - Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Heft 4, 301-316.

Kersten, Th., Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., 2016. Investigations into the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems. PFG - Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 5-6, 271-283.

Kap. 3. Objektmodellierung auf Basis statischer Scans

Kersten, Th., Lindstaedt, M., Vogt, B., 2009. Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Heft 1, 79-90.

Kersten, Th., 2007. Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. International Journal of Architectural Computing, Special Focus on Cultural Heritage, Issue 02, Volume 05, Published by Multiscience, 339-354.

Kap. 4. Objektmodellierung auf Basis kinematischer Scans

Kersten, Th., Büyüksalih, G., Baz, I., Jacobsen, K., 2009. Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning. The Photogrammetric Record, 24(126), 122-138.

Kersten, Th., Böder, V., Thies, Th., 2011. Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser. AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 7, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 330-335.

Kap. 5. Alternative Verfahren für die Generierung von Punktwolken

Kersten, Th., Lindstaedt, M., 2012. Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications. PFG – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 6, 727-740.

1.2. Punktwolken durch scannende Systeme

1.2.1. Technische Spezifikationen terrestrischer Laserscanner

Heute werden 3D-Punktwolken auf der einen Seite durch die Verfahren des airborne und terrestrischen Laserscannings und andererseits durch die Verfahren der digitalen Luftbild- und Nahbereichsphotogrammetrie generiert. Waren es zu Beginn der Entwicklung Anfang der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts nur Laser-Profilmessungen (Lindenberger 1993), konnten die flugzeuggetragenen Laserscanner kurze Zeit später aus einer durchschnittlichen Flughöhe von 1000 m über Grund je nach System eine Punktdichte von 1 Punkt pro 20 m² bis 20 Punkte pro m² erfassen (Ackermann 1999). Die Punktdichte hängt dabei von dem eingesetzten System und von einem Kompromiss zwischen den Parametern Fluggeschwindigkeit, Pulsrate, Scanwinkel und Flughöhe ab. Aktuell können aus einer Flughöhe von 350 m Punktdichten von 60 pro m² und mehr erreicht werden. Allerdings sollte bei der Aufnahme immer die Strahldivergenz berücksichtigt werden, da Messungen mit zu großen Laserspots bei einer hohen Punktdichte stärker korrelieren. Eine deutlich höhere Punktdichte von bis zu 1500 Punkten pro m² mit einem durchschnittlichen Punktabstand von 2,5 cm kann mit dem Laserscanner Riegl VUX-SYS (Messprinzip Laufzeitverfahren) auf einem UAS (Unmanned Aerial System) erfasst werden (Mandlbauer et al. 2015).

Scannte einer der ersten terrestrischen Laserscanner (Callidus CP 3200) im Jahr 2000 bei einem Messbereich von bis zu 32 m mit dem Impulslaufzeitverfahren erst ca. 1.000 Punkte/sec (Mucke 2002), vier Jahre später der Mensi GS100 maximal 5.000 Punkte/sec, so generieren die heutigen terrestrischen Laserscanner wie der Riegl VZ-400i mit dem gleichen Messverfahren bis zu 42.000 Punkte/sec (bzw. 500.000 Punkte/sec) bei einer Reichweite von ca. 800 m (bzw. 250 m). Scanner mit dem Phasendifferenzverfahren wie der IMAGER 5003 verfügten bereits früh über Datenraten von maximal 625.000 Punkte/sec, während heute z.B. das aktuelle Modell IMAGER 5016 von Zoller + Fröhlich über eine Million Punkte pro Sekunde bei einer Reichweite von 360 m messen kann, was keine so signifikante Steigerung gegenüber den Vorgängermodellen bedeutet wie bei den Impulslaufzeitscannern. Hatten diese bereits früh Reichweiten von 100 m bis 1400 m, so entwickelten sich die Phasendifferenzscanner langsam von 53 m im Jahr 2003 auf heute 360 m, wie mit dem Beispiel des terrestrischen Laserscanners der IMAGER-Serie von Zoller + Fröhlich aus Wangen im Allgäu in Abb. 1.1 zu sehen ist. Eine Übersicht aktueller terrestrischer Laserscanner ist in Tab. 1.1 zusammengefasst.

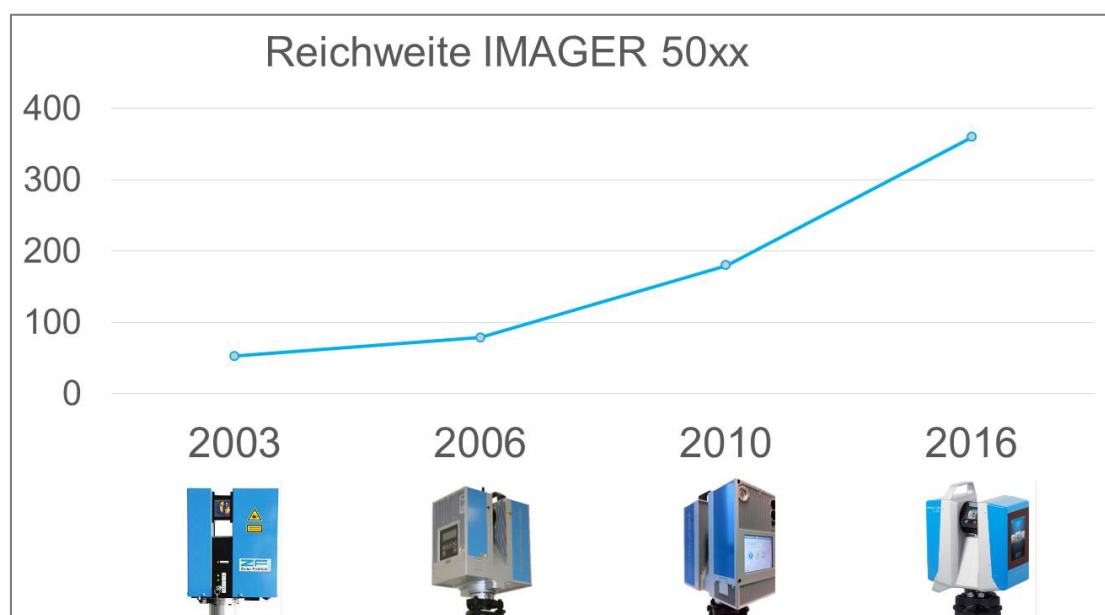


Abb. 1.1: Entwicklung der Reichweite [m] der terrestrischen Laserscanner-Serie IMAGER 50xx (Messverfahren: Phasendifferenz) im Zeitraum von 2003 bis 2016.

Tabelle 1.1: Technische Spezifikationen aktueller, ausgewählter terrestrischer Laserscanner der wichtigen Systemhersteller

Scanner/Kriterium	Leica P40	Faro Fokus ^{3D} x330	Riegl VZ-400i	Z+F IMAGER 5016
Messverfahren	Impuls (TOF)	Phase	Impuls	Phase
Full waveform digitisation	ja	nein	ja	nein
Gesichtsfeld [°]	360 x 290	360 x 300	360 x 100	360 x 320
Scandistanz [m]	0,4-270	0,6-330	0,5-800	0,3-365
Scangeschwindig. [pts/s]	1.000.000	976.000	500.000	1.094.000
Winkelauflösung H/V [°]	8"/8"	0,009/0,009	0,0005/0,0007	0,00018/0,00026
Wellenlänge [nm]	1550/658	1550	Nahes IR	keine Angabe
3D Punktgenauigkeit	3mm@50m	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
Distanzgenauigkeit [mm]	1,2+10ppm	2mm/25m	5 /100m	keine Angabe
Kamera	integriert HDR	integriert HDR	Aufsatz	integriert HDR
Gewicht [kg]	12,25	5,2	9,7	7,5
Neigungssensor	2-Achs-Komp.	2-Achs-Komp.	ja	Dynam. Komp.
Weitere integr. Sensoren	-	-	IMU, GNSS	IMU, GPS

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit auf dem Markt stellte sich auch die Frage, was terrestrische Laserscanner leisten können? Welche Genauigkeiten weisen sie auf, welche Grenzen haben sie, und für welche Aufgabenbereiche bzw. Anwendungen sind sie idealerweise einsetzbar? Für eine Vielzahl von Anwendern stellten sich die terrestrischen Laserscanner anfänglich als Blackbox dar, so dass Untersuchungen über das Leistungs- und Genauigkeitsverhalten der verschiedenen Systeme für diese Zielgruppe wünschenswert und letztendlich auch erforderlich waren. Hochschulen können solche Genauigkeitsuntersuchungen leisten und auch aus neutraler Sicht bewerten, ob die auf dem Markt verfügbaren Systeme den technischen Spezifikationen der Hersteller entsprechen und den Anforderungen bestimmter Anwendungen genügen. Dadurch bieten sie der Praxis wertvolle Informationen, die von Ingenieurbüros selten und nur in Ausnahmefällen erarbeitet werden können, da sie meist nicht über die erforderliche Zeit, personelle Ressourcen und über entsprechende Instrumente und Prüfscenarien verfügen. Die technischen Spezifikationen der auf dem Markt verfügbaren Laserscanner sind aufgrund der unterschiedlichen technischen Parameter oft nicht vergleichbar, d.h. die Qualitätsangaben der Hersteller sind uneinheitlich, unvollständig und wenig aussagekräftig. Die erste Zusammenstellung der auf dem Markt verfügbaren terrestrischen Laserscanner wurde von Kern (2002) veröffentlicht, in der er einige Qualitätsparameter der Scanner vergleichend gegenüber stellte. Eine sehr detaillierte Produktübersicht für terrestrische Laserscanner stellte Lemmens (2007) fünf Jahre später zusammen. Viele Faktoren beeinflussen die geometrische Qualität einer Punktwolke, die durch die Punktdichte und die Genauigkeit der jeweiligen 3D-Punktkoordinaten gekennzeichnet ist. Wird einerseits die radiale Punktdichte durch die Winkelauflösung des Laserscanners beeinflusst, so hängt andererseits die 3D-Punktgenauigkeit von vielen verschiedenen Kriterien ab. Der Gesamtfehlerhaushalt des terrestrischen Laserscannings wird nach Gottwald et al. (2009) durch folgende Einflussgrößen charakterisiert, die wiederum von zahlreichen Parametern beeinflusst werden: Messinstrument (Strecke, Winkel, Synchronisation, Kalibrierung), Messraum (Refraktion, Vibrationen, optische Störungen), Messobjekt (Größe, Orientierung, Krümmung, Oberflächeneigenschaften inkl. Farbe) sowie Messverfahren (Geometrie der Aufnahme von Form von Abständen der Scannerstandpunkte, Anzahl Scans, Ort/Anzahl der Targets sowie Einsatz mit/ohne Tachymetrie) und Auswerteverfahren (Registrierung als Verknüpfung und/oder Georeferenzierung sowie Berechnung geometrischer Elemente wie Kugel, Zylinder und Ebene). Die Fehlerursachen und Einflüsse einzelner Komponenten lassen sich nur sehr schwer voneinander trennen und können daher nur exemplarisch und mit viel Aufwand bestimmt werden. Die Systemhersteller geben heute verschiedene Qualitätsmaße für ihre

Laserscanner in den jeweiligen Datenblättern über die technischen Spezifikationen an: Streckenmessgenauigkeit, Winkelmessgenauigkeit, Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten (Einzelpunkt) oder der abgeleiteten ebenen Fläche.

1.2.2. Untersuchungen terrestrischer Laserscanner

Für den Anwender ist es wichtig, das Leistungspotential seines terrestrischen Laserscanners kennen und einschätzen zu lernen, damit er das System optimal für seine entsprechenden und dafür passenden Anwendungen einsetzen kann. Da haben sich gerade die Hochschulen bzw. Universitäten überwiegend in Deutschland, in Europa und in Australien der Aufgabe angenommen, die Laserscanner in verschiedenen Prüfverfahren, die an den jeweiligen Instituten und Laboren der Hochschulen selbst entwickelt wurden, auf die geometrische Genauigkeit und die Funktionalität zu untersuchen.

Kurz nach Markteinführung wurden bereits die ersten Untersuchungen von terrestrischen Laserscannern veröffentlicht. Lichti et al. (2000) waren mit die ersten Autoren, die ihre wissenschaftlichen Untersuchungen über Laserscanner publizierten. Sie untersuchten den australischen I-Site Scanner (Impulslaufzeitverfahren, Wellenlänge des Lasers 900 nm, vertikales Gesichtsfeld (FOV) von $\pm 40^\circ$, 300° horizontal FOV, Reichweite 350 m) auf einer Basisstrecke 1. Ordnung zur Kalibrierung von Entfernungsmessinstrumenten an der Curtin University of Technology in Perth und in einem hochgenauen GPS-kontrollierten geodätischen Netz zum Monitoring von Deformationen am Steindamm North Dandalup im Süden von Perth, West-Australien. Bei den Untersuchungen konnte eine Genauigkeit für den einfachen Punkt von $\pm 3\text{--}5\text{ cm}$ (1σ) nachgewiesen werden, was für die Anwendungen im Tageabbau australischer Minen ausreichte. Eine flächenbasierte Deformationsanalyse von Türmen und einem Staudamm mithilfe von terrestrischem Laserscanning stellte Schneider (2006) vor.

Weitere Untersuchungen von terrestrischen Laserscannern folgten an verschiedenen europäischen Hochschulen mit unterschiedlichen Prüfverfahren: Universität Ferrara, Italien (Balzani et al. 2002), KTH Stockholm, Schweden (Johansson 2002; Reshetyuk 2006; Reshetyuk 2009), University College London, England (Clark & Robson 2004), ETH Zürich, Schweiz (Ingensand et al. 2003; Schulz & Ingensand 2004; Ingensand 2006), TU Dresden (Mulsow et al. 2004, Schneider 2009), Fachhochschule Nordwestschweiz (Gottwald 2008), Hochschule Mainz (Böhler et al. 2003; Boehler & Marbs 2004; Kern 2008; Kern & Huxhagen 2008), TU Darmstadt (Gordon 2008a; Gordon 2008b), Hochschule Bochum (Staiger & Ettel 2003; Staiger 2005), HTW Dresden (Wehmann et al. 2007), TU München (Wunderlich et al. 2013) und an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg bzw. an der HafenCity Universität Hamburg (Kersten et al. 2004; Sternberg et al. 2005; Mechelke et al. 2007; Kersten et al. 2008; Lindstaedt et al. 2009; Lindstaedt et al. 2011).

In dem ersten Fachartikel „**Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems**“, von Kersten et al. (2009), veröffentlicht im Heft 4 der Fachzeitschrift *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, werden verschiedene Methoden für geometrische Genauigkeitsuntersuchungen terrestrischer Laserscanner vorgestellt. Als Instrumente für die verschiedenen Untersuchungen standen folgende Laserscanner zur Verfügung: (a) Scanner mit Impulslaufzeitverfahren: Trimble GX, Leica ScanStation 1, Leica ScanStation 2, RIEGL LMS-Z420i, und (b) Scanner mit Phasendifferenzverfahren: Leica HDS 6000, Faro LS 880, IMAGER 5006 von Zoller & Fröhlich. Diese Scanner wurden mit folgenden vier Untersuchungsmethoden auf geometrische Genauigkeit getestet: (1) Bestimmung der Kugelabstandsabweichungen in einem 3D-Testfeld in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, (2) Genauigkeitsbestimmung der Distanzmessungen durch Streckenvergleich mit einem Referenzsystem, (3) Genauigkeitsuntersuchungen zur Kompensation durch den Neigungssensor und (4) Untersuchungen zum Einfluss des Auftreffwinkels auf die Genauigkeit.

Bei der ersten Untersuchung im Testfeld ist die 3D-Punktgenauigkeit eines 3D-Laserscannersystems bzw. die Streckengenauigkeit zwischen Kugeln durch eine Kombination von Abweichungen und Messunsicherheiten beeinflusst, die nicht separat bestimmt werden können: Distanz- und Winkelmessung des Scanners, Einpassung der Kugeln in die Punktwolke und Zentrierfehler der Kugeln. Somit kann hier nur eine Aussage über den gesamten Fehlerhaushalt getroffen werden, nicht über einzelne Komponenten. Beim Scanning des Testfeldes wurde jeder Scanner auf fünf räumlich verteilten Standpunkten aufgestellt und es wurden alle sichtbaren im Testfeld verteilten Kugeln vom jeweiligen Standpunkt gescannt. Die verwendeten weiß-matt lackierten Hohl-Kugeln aus Plastik haben einen Durchmesser von 147 mm bzw. 199 mm. Zur Bestimmung des jeweiligen Kugelzentrums wurde wie in allen bisherigen Untersuchungskampagnen das Programm RealWorks Survey der Firma Trimble eingesetzt, so dass dieser Schritt für alle Scanner unter gleichen Bedingungen stattfand. Die Ergebnisse des Kugel-Fittings wurden durch ein an der HCU Hamburg entwickeltes Matlab-Programm bestätigt, so dass hier Berechnungsfehler der Kugelparameter ausgeschlossen werden konnten. Zwischen allen Streckenkombinationen wurden aus den jeweiligen Kugelzentren die entsprechenden Strecken berechnet, die den Sollstrecken aus der Referenzmessung gegenübergestellt wurden. Als wichtige Kenngröße wurde die Spanne als Differenz der positiven und negativen maximalen Abweichung zur Sollstrecke bestimmt, ähnlich wie es bereits bei photogrammetrischen Genauigkeitsuntersuchungen von digitalen Kameras in einem Testfeld durch Peipe & Schneider (2003) erfolgte. Die errechneten Strecken sind zwar sehr stark mit einander korreliert, aber sie erlauben dennoch eine Aussage über die Genauigkeit im Vergleich zu anderen Scannern und bei Verwendung gleicher Instrumente über die Wiederholbarkeit. Die Ergebnisse von verschiedenen Untersuchungen unterschiedlicher terrestrischer Laserscanner sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt.

Tabelle 1.2: Vergleich der 3D-Strecken im Testfeld zwischen unterschiedlichen Laserscannern und Referenz in verschiedenen Messkampagnen

Scanner	Test	Kugel [mm]	# 3D Punkte	# Strecken	Δl min [mm]	Δl max [mm]	Spanne [mm]	Publikation
Leica ScanStation 1	03/2007	147	38	703	-9,2	2,3	11,5	A
Trimble GX	03/2007	147	38	703	-27,6	16,0	43,6	A
Z+F IMAGER 5006	03/2007	147	38	703	-6,6	7,4	14,0	A
Faro LS 880 HE	03/2007	147	38	703	-30,7	41,1	71,8	A
Leica ScanStation 1	10/2007	199	29	351	-5,4	6,5	11,9	B
Leica ScanStation 2	10/2007	199	29	351	-5,4	6,5	11,9	B
Leica HDS6000	10/2007	199	30	406	-6,7	6,3	13,0	B
Z+F IMAGER 5006	10/2007	199	30	406	-5,7	7,7	13,4	B
Trimble FX 6dpi	12/2007	199	30	465	-23,0	7,8	30,8	C
Trimble FX 6dpi	12/2007	199	29	434	-24,0	9,6	33,6	C
Faro Photon 80	12/2007	199	30	465	-5,2	9,8	15,0	C
Z+F IMAGER 5006	12/2007	199	30	465	-5,8	10,3	16,1	C
Riegl VZ-400	06/2010	199	28	378	-11,1	4,4	15,5	D
Riegl VZ-400	06/2010	Target	27	351	-3,5	4,8	8,3	D
Z+F IMAGER 5006i	06/2010	199	28	378	-3,3	5,4	8,7	D
Leica C10	06/2010	199	28	378	-3,6	6,1	9,7	D
A: Kersten et al. 2009 (siehe Kap. 2.1.); B: Mechelke et al. 2008; C: Lindstaedt et al. 2009; D: Lindstaedt et al. 2011								

Aus den Ergebnissen in Tab. 1.2 können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ✓ Die Leica Scanner (ScanStation 1 und 2, C10) zeigen ein sehr homogenes Genauigkeitsverhalten und erreichen eine hohe Wiederholbarkeit.
- ✓ Die Z+F IMAGER 5006 (inkl. dem baugleichen Leica HDS 6000) zeigen auch ein sehr homogenes Genauigkeitsverhalten und erreichen eine hohe Wiederholbarkeit, wobei das Ergebnis des 5006i die gerätetechnische Verbesserung des Messinstrumentes widerspiegelt.
- ✓ Der Faro Photon 80 zeigt gegenüber seinem Vorgängermodell LS 880 HE eine deutliche Genauigkeitssteigerung.
- ✓ Die Trimble Scanner haben grundsätzlich beim Kugelfitting ein Problem mit den verwendeten Kugeln (Material, Größe). Sie können die Genauigkeiten der anderen Scanner (Ausnahme Faro LS 880) bei weitem nicht erzielen.
- ✓ Beim Scanner Riegl VZ-400 bringt die Verwendung der reflektiven Zielzeichen (Target) im Vergleich zu Kugeln eine signifikante Genauigkeitssteigerung, die das Niveau der beiden Scanner IMAGER 5006i und Leica C10 erreicht.
- ✓ Die Genauigkeit der terrestrischen Laserscanner erhöht sich mit den neuen Generationen von Laserscannern (Vermutung), was allerdings durch weitere Untersuchungen verifiziert werden muss.

In späteren Untersuchungen (Lindstaedt et al. 2009; Lindstaedt et al. 2011) wurden statt allen Streckenkombinationen nur sieben ausgewählte und im Testfeld gut verteilte Strecken gemäß Vorgaben der VDI/VDE 2634 verwendet, jedoch zeigten diese Ergebnisse einen zufälligen Charakter, so dass sie kritisch betrachtet werden müssen.

Um die Streckenmessgenauigkeit der untersuchten Scanner zu evaluieren, wurde einerseits eine Referenzstrecke von bis zu 100 m auf Stativen in 10 m Abständen entlang einer ebenen Straße aufgebaut, andererseits wurde für die beiden Scanner mit höherer Reichweite (Leica ScanStation 2 und Riegl LMS 420i) die offizielle Eichstrecke des Landesbetriebs Geoinformation und Vermessung der Freien und Hansestadt Hamburg im Friedhof Ohlsdorf mit einer maximalen Distanz von 430 m verwendet. Während auf der 100 m Referenzstrecke mit einer Totalstation Leica TCRP 1201 die einzelnen Distanzen zehn Mal vor und zehn Mal nach dem Scannen gemessen wurden, diente auf der Eichstrecke in Ohlsdorf eine Totalstation Leica TCA2003 als Referenz, deren Strecken im Durchschnitt um 0,5 mm von denen mit einem Kern Mekometer 5000 bestimmten Distanzen, gemessen vor den Untersuchungen, abwichen. Bei den Untersuchungen wurden die vom Hersteller empfohlenen Zielzeichen bzw. Kugeln für die jeweiligen Scanner eingesetzt. Als Ergebnisse wurden die Streckenvergleiche (Ist minus Referenz) in Graphiken zusammengestellt, die bei einigen Scannern (Z+F IMAGER 5006, Leica ScanStation 1 und Riegl LMS 420i) sehr stabile Resultate (homogene Abweichungen für alle Distanzen) bestätigten, während bei anderen Scannern schlechte Ergebnisse (Faro LS880) und Abweichungen, die eine Systematik vermuten lassen (Trimble GX und Leica ScanStation 2), dokumentiert wurden. Mit zunehmender Entfernung wurden die Abweichungen zur Referenz größer, so dass beim Trimble GX und bei der Leica ScanStation 2 ein Maßstabsfaktor vermuten werden kann. Auch in nachfolgenden Untersuchungen in Lindstaedt et al. (2009) und Lindstaedt et al. (2011) konnten die Ergebnisse der Streckenvergleiche das Genauigkeitsverhalten der untersuchten Scanner aufzeigen und somit dem Anwender einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit der Instrumente geben.

Die Untersuchungen des Neigungssensors auf einem Sportplatz zeigten für die verschiedenen Scanner eindeutig den Einfluss der Neigungskompensation. Während Scanner mit Neigungskompensation (Leica ScanStation 1+2, Trimble GX) kaum Abweichungen von einer XY-Ebene aufwiesen (bis zu 1-2 mm), zeigten die anderen Scanner ohne laufende Kompensation der Neigung einen sinusförmigen Taumeleffekt von bis zu 15 mm (IMAGER) bzw. 20 mm (Faro) (Fig. 9 in Kap. 2.1, S. 36).

Der Auftreffwinkel des Laserstrahls auf das Objekt hat einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen. Trifft der Laserstrahl nicht senkrecht auf das Objekt, so ist die Auftrefffläche des Lasers kein Kreis mehr und die Streckenmessung kann durch diese Formabweichung verfälscht werden. Das Zentrum des Laserstrahls ist zudem nicht mehr identisch mit der Winkelmessung, die Punktposition wird so verfälscht. Um den Einfluss des Auftreffwinkels bestimmen zu können, wurde eine ebene Steinplatte in zehn verschiedenen Winkelpositionen relativ zum Scanner in einem Abstand von 10 m aufgenommen, wobei vor der Steinplatte vier Kugeln (Mensi-Kugel aus Hartplastik) angebracht wurden, die in jedem Scan mit erfasst wurden. In der Auswertung wurden ausgleichende Ebenen sowohl durch die Punktwolke der Platte, als auch durch die vier Kugelzentren gelegt. Der Abstand der beiden Ebenen in der ersten Messung mit dem Einfallswinkel von 0° (d.h. senkrecht auf die Platte gemessen) wurde als Referenz für die übrigen Messungen gesetzt und die Abweichungen davon graphisch aufgetragen (Fig. 12, S.37). Die Abstände zwischen Platten-Ebene und Kugel-Ebene wurden größtenteils kontinuierlich größer, d. h. die Streckenmessungen waren bei zunehmendem Einfallswinkel länger im Vergleich zur Referenzmessung. Dieser Effekt trat bei Scannern mit dem Phasendifferenzmessverfahren viel deutlicher auf, so dass bei der größten Neigung der Platte die Abweichung bis zu einem Faktor 12 höher war als bei Scannern mit Impulslaufzeitmessverfahren. Diese Ergebnisse konnten wiederum in den nachfolgenden Untersuchungen bestätigt bzw. reproduziert werden (Lindstaedt et al. 2009; Lindstaedt et al. 2011; Lindstaedt et al. 2012). Neue Untersuchungen zum Einfluss des Auftreffwinkels auf die reflektorlose Distanzmessung wurden von Zámečnicková & Neuner (2014) veröffentlicht.

1.2.3. Untersuchungen handgeführter 3D-Scanner

Bei kleinräumigen Aufnahmebereichen stellen handgeführte 3D-Scanner eine sehr gute Ergänzung zu terrestrischen Laserscannern dar, da sie gerade die etwas schwierig zugänglichen Bereiche im Objektraum flexibel und leicht handhabbar aufnehmen können, um so ggf. Punktwolken zu vervollständigen. Somit schließen mobile 3D-Handscanner, von denen mit dem Polhemus FastScan (McCallum et al. 1996) bereits erste Systeme seit Ende der 1990er Jahre auf dem Markt sind, die Lücke zwischen den statischen Laserscannern und Streifenprojektionssystemen, um in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen eingesetzt zu werden. In industriellen und medizinischen Anwendungen mit höheren Genauigkeitsanforderungen und geringem Objektvolumen wurden jedoch Triangulationsscanner wie z.B. der Konica Minolta Vivid 9i oder Vivid 910 eingesetzt. Gerade in den letzten fünf Jahren sind viele neue handgeführte Messsysteme auf den Markt gekommen, um viele verschiedene Anwendungsbereiche zu erschließen. Man unterscheidet bei den mobilen handgeführten Messsystemen zwischen Laserscannern, wie das Mobile Mapping System ZEB1 von Geoslam aus Nottingham, England, das mit dem Laufzeitverfahren eine maximale Reichweite von 30 m im Innenbereich (außen bis 15 m) erreicht, sowie verschiedenen Systemen nach dem Triangulationsprinzip (mit Laserlinien- oder Musterprojektion) und Kameras mit dem Messprinzip „Time-of-Flight“. Das Funktionsprinzip und erste Genauigkeitsuntersuchungen zum ZEB1 werden von James & Quinton (2014) und von Chan et al. (2016) vorgestellt.

Somit stellt sich auch hier für den Anwender die Frage, welches Genauigkeitsverhalten können handgeführte Nahbereichsmesssysteme garantieren? In dem zweiten Fachartikel „**Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems**“, von Kersten et al. (2016b) veröffentlicht im Heft 5-6 der Fachzeitschrift *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, wird das Genauigkeitspotential verschiedener handgeführter 3D-Scanner anhand von Test- und Referenzkörpern evaluiert. Als Referenz und zum Vergleich wurden die verschiedenen Testobjekte (maximale Höhe 38 cm) mit deutlich genaueren Streifenprojektionssystemen aufgenommen. Umfassende und vergleichende Untersuchungen hat es bisher mit handgeführten Messsystemen nicht gegeben. Erste Untersuchungsergebnisse wurden durch Kersten et al. (2016a) vorgestellt, die teilweise auch die

Grundlage für diesen zweiten Fachartikel bilden. Während bei den ersten Untersuchungen die handgeführten Scanner DOTProduct DPI-7, Artec Spider, Mantis Vision F5 SR, Kinect v1 + v2, Structure Sensor und Google's Project Tango validiert wurden, lag der Fokus bei den weiteren Untersuchungen für diesen zweiten Fachartikel auf den marktüblichen Systemen DOTProduct DPI-7/DPI-8, Artec Spider, Mantis Vision F5 SR und Creaform HandySCAN 700. Bei den geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen wurde mit den unterschiedlichen Referenzkörpern (Einsteinbüste aus Gips, geometrischer Körper Testy und die aus Aluminiumguss bestehende Radnabe) für jedes Messsystem jeweils ein 3D-Vergleich durchgeführt. Zuerst zeigte sich, dass die Operateure der mobilen Systeme Schwierigkeiten hatten, die verschiedenen Testkörper vollständig aufzunehmen. Denn die Aufnahme erfordert langsame, gleichförmige Bewegungen um und über dem Aufnahmeobjekt, damit es nicht zum Signalabriss kommt, was jedoch bei einigen Systemen (DotProduct, Artec Spider und Kinect) häufiger vorkam. Einzig das photogrammetrische System Creaform HandySCAN 700 schaffte problemlos jeweils eine komplette Objektaufnahme, da die Verknüpfung der Scans nur durch retroreflektierende Zielmarken unterstützt wurde. Hinsichtlich der Messgenauigkeit lagen fast alle untersuchten Systeme sehr weit von der Genauigkeit der Referenzsysteme entfernt. Einige evaluierte Systeme (z.B. Mantis F5 und Structure Sensor) zeigten sogar Maßstabsprobleme, die auf eine unzureichende Systemkalibrierung hinweisen. Nur der Creaform HandySCAN 700 erreichte Genauigkeiten für die Testkörper, die dem des Referenzsystems entsprachen. Mit den beiden verfügbaren geometrisch stabilen Referenzkörpern (ein kreuzförmiger Körper mit fünf Kugeln aus Stahl, die einen max. Abstand von 450 mm und jeweils einen Durchmesser von 65 mm aufweisen, und einer ebenen Granitplatte mit der Größe von 300×300 mm²) konnten weitere Kenngrößen bestimmt werden, die wiederum eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Ergebnisse ermöglichen. Die in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, ermittelten Kenngrößen (Antast- und Kugelabstandsabweichungen) weisen nach, dass bei einigen Handscannern der Geräte-Maßstab nicht exakt bestimmt wurde, bzw. auf Grund eines mechanisch zu wenig soliden Aufbaus des Sensors möglicherweise nicht langzeitstabil ist. Die Ergebnisse zur Ebenheitsmessabweichung dokumentieren, dass bildbasierte Aufnahmeverfahren mit Kameras (z.B. Creaform HandySCAN 700) aufgrund der vorhandenen Struktur auf dem Untersuchungsobjekt sogar bessere Ergebnisse liefern als Streifenprojektionssysteme, während die Systeme mit aktiver Projektion um den Faktor 8 - 50 höhere Abweichungen aufweisen als das Referenzsystem. Generell haben die geometrischen Untersuchungen der handgeführten 3D-Scanner bestätigt, dass sich die meisten Systeme (noch) nicht für eine präzise Aufnahme von kleinen Objekten eignen, aber sehr wohl eine gute Ergänzung für terrestrische Laserscanner bei der Aufnahme von komplexen Raumstrukturen sein können.

1.3. Geometrische Objektmodellierung auf Basis von Punktwolken statischer Scans

Unter dem Begriff „Geometrische Modellierung“ versteht man die computergestützte Beschreibung (Computer-Aided Design CAD) der Form geometrischer Objekte wie sie z.B. in der Architektur, Denkmalpflege und Archäologie vorkommt. Zwar wird die Modellierung auch für die Beschreibung zweidimensionaler Kurven verwendet, jedoch geht es in den folgenden Abschnitten um die Modellierung von dreidimensionalen Flächen und Körpern. Wird jetzt die Punktwolke als geometrischer Basisdatensatz verwendet, um daraus 3D-Modelle der gescannten oder durch Fotos aufgenommenen Objekte zu generieren, dann ist heute eine volle Automation in der 3D-Modellierung mit ansprechendem Detail und hoher Genauigkeit (± 1 cm) für das virtuelle 3D-Volumenmodell komplexer architektonischer Objekte oder Kulturerbestätten mit Daten aus der Photogrammetrie und vom terrestrischen Laserscanning immer noch nicht gelöst. Zwar gibt es bereits vielversprechende Ansätze bei der Verwendung von 3D-Punktwolken für einen automatischen Datenfluss in der Objektmodellierung, jedoch leiden vielfach der Detailreichtum, die Vollständigkeit, die Genauigkeit und die semantische

Interpretation für das zu generierende 3D-Produkt darunter. Daher lassen sich automatisierte Auswerteverfahren bei der Objektmodellierung für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie heute noch eher sehr selten finden, da die Objekte oft sehr komplex und die Anforderungen an eine detaillierte Auswertung (high-level Interpretation) recht hoch sind. Allerdings wurden einige Beispiele zur automatischen Erstellung von 3D-Modellen und deren Grenzen publiziert, jedoch sind diese Verfahren noch nicht in der täglichen Praxis verbreitet. Somit stellen sie weiterhin wichtige Themen der universitären Forschung dar, jedoch sie sind momentan noch nicht universell einsetzbar.

Im Gegensatz dazu bieten eine automatisierte Datenerfassung durch digitale Photogrammetrie, durch terrestrisches Laserscanning und deren Kombination sowie die manuelle und teilautomatisierte 3D-Modellierung dieser Daten eine zuverlässige 3D-Objektrekonstruktion mit hoher Präzision und mit entsprechendem Detail. Anhand verschiedener praktischer Beispiele werden die Vorteile der manuellen 3D-Modellierung vorgestellt und die Nachteile kritisch analysiert.

Je nach Aufnahme- und Auswerteverfahren stehen für die 3D-Modellierung folgende Daten zur Verfügung: a) diskrete 3D-Punkte aus photogrammetrischen Bildpunktmessungen durch räumlichen Vorwärtsschnitt, b) Punktwolken aus Dense Image Matching in photogrammetrischen Bildern, c) Punktwolken durch terrestrisches Laserscanning oder Kombinationen aus b) und c). Für die Modellierung der Objekte stehen dem Anwender je nach Komplexität des Objektes und je nach gewünschtem Produkt zwei wesentliche Arbeitswege offen. Zum einen kann aus den diskreten Punkten in weitestgehend manueller Arbeit ein CAD-Modell erstellt werden, während zum anderen die Punktwolke durch Dreiecksvermaschung zu einem Oberflächenmodell verarbeitet werden kann. Außerdem kann auch ein hybrides 3D-Modell erstellt werden, in dem vermaschte Objektteile im CAD-Modell integriert werden. Vor allem bei der Bearbeitung von Punktwolken hat das Datenvolumen einen entscheidenden Einfluss auf die weiteren Arbeitsschritte. Je nach Objektgröße resultieren die Punktwolken in enormen Datenmengen, die vorhandene Rechner aufgrund systembedingter Beschränkungen (Betriebssystem, RAM, Graphikkarte und Rechenleistung) an ihre Leistungsgrenzen bringen. Daher sind eine Datenreduktion über Filterung und/oder eine Segmentierung der Punktwolke effiziente Lösungen.

1.3.1. Automation in der geometrischen Objektmodellierung auf Basis von Punktwolken

Bei der automatisierten 3D-Rekonstruktion lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Vorgehen unterscheiden, es wird entweder modellgetrieben oder datengetrieben verfahren. Im modellgetriebenen Ansatz wird von a priori Wissen über das zu modellierende Objekt, wie z.B. von einem CAD-Modell ausgegangen, dessen korrekte Lage und Größe dann durch die Punktwolke bestimmt wird. Andersherum werden im datengetriebenen Vorgehen einzelne Elemente wie Punkte, Kanten oder Ebenen in den Punktwolken (also aus den beobachteten Daten) ohne Vorwissen über geometrische oder topologische Objekteigenschaften extrahiert, die dann zu komplexen 3D-Objektgeometrien kombiniert werden. Oftmals werden Kombinationen aus beiden Verfahren als vielversprechend angesehen, denn beide Verfahren werden bereits seit Jahren erfolgreich in der Auswertung luftgestützt erfasster Daten verwendet. Erste Ansätze zur automatischen 3D-Objektrekonstruktion (Gebäude und Geländebruchkanten) aus airborne Laserscanningdaten wurden bereits Ende der 1990er und Anfang der 2000er Jahre veröffentlicht (Haala & Brenner 1997; Maas 1999; Brügelmann 2000; Maas 2001; Briese 2004; Rottensteiner & Briese 2004; Schwalbe et al. 2004).

Für die Auswertung von terrestrisch erfassten Laserscanningdatensätzen seien hier anhand des Beispiels Architektur- und Fassadenrekonstruktion einige Entwicklungen der letzten Jahre aufgezeigt. Diese Aufgabe ist aufgrund des Maßstabes und der Geometrie deutlich komplexer als die Auswertung von airborne Laserscanningdaten. Dabei beschränken sich die auszuwertenden Daten oftmals nicht auf eine einzelne Erfassungsart, denn vielmehr werden Kombinationen eingesetzt, wie z.B.

Punktwolken und Bilddaten. Becker und Haala (2007) nutzen ein vorhandenes 3D-Stadtmodell und verfeinern dieses über mobile LiDAR-Punktwolken. Dabei werden die Fenster des Gebäudes detektiert, indem größere Flächen ohne Punkte gesucht werden. Durch die Verwendung hochauflösender Bilder können zusätzlich noch weitere Informationen gewonnen werden, die in der Auflösung der Punktwolke nicht erkennbar sind. Ähnlich gehen auch Pu & Vosselman (2009) vor. Über Region Growing werden in der Punktwolke Ebenen wie Fassaden oder Dachflächen segmentiert, wobei die Fenster ebenso über Lücken von Punkten definiert werden. In zusätzlich erfassten Bildern werden über Kantenerkennung die Modellkanten aus der Punktwolke verbessert und anschließend kann noch eine Texturierung der modellierten Objekte durchgeführt werden.

Briese (2006) stellt ein automatisiertes Verfahren vor, um aus terrestrischen Laserscanningdaten in Innenräumen oder von Gebäuden Strukturlinien zu generieren. Im Prozess der Bruchkantenmodellierung ist jedoch ein Startwert nahe der zu detektierenden Bruchkante in 2D erforderlich.

Brenner (2008) gibt einen Überblick über Möglichkeiten der low-level und intermediate-level Extraktion. Im low-level Bereich werden vor allem Möglichkeiten der Flächensegmentierung entwickelt. Hier gibt es eine Reihe von Verfahren, die häufig zum Einsatz kommen, wie z.B. u.a. die drei folgenden Möglichkeiten: das Region Growing Verfahren (z.B. Brenner & Dold 2004), RANSAC (Fischler & Bolles 1981) oder die Hough-Transformation (Hough 1962).

Arikan et al. (2013) stellen einen neuen Workflow für die automatisierte Rekonstruktion und Modellierung von Objekten zur Erstellung von Polygonmodellen aus unstrukturierten Punktwolken vor (Abb. 1.2). Zuerst wird die verrauschte und nicht komplette Punktwolke in Teilbereiche auf jeweils derselben Ebene zerlegt (A), danach folgen die Extraktion von Eckpunkten dieser Teilbereiche, die Erstellung grober Polylinien und deren lokale grobe Zuordnung über eine nicht-lineare Optimierung, aus der eine Näherung der Objektrekonstruktion hervorgeht (B). Durch eine interaktive Benutzerführung wird die Zuordnung der Objektebenen verfeinert (C) und anschließend rechnerisch an die Punktwolke angepasst (D).

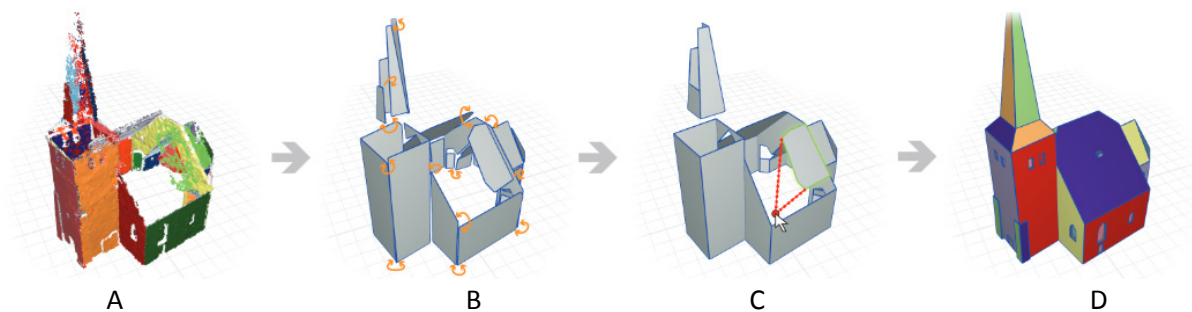


Abb. 1.2: Überblick über die Arbeitsschritte des Workflows für die automatisierte Rekonstruktion und Modellierung von Objekten zur Erstellung von Polygonmodellen aus unstrukturierten Punktwolken nach Arikan et al. (2013)

1.3.2. Engineering Modelling – Objektrekonstruktion mithilfe geometrischer Primitive im CAD

Die CAD-Objektrekonstruktion erfolgt grundsätzlich in einem vektororientierten Zeichenprogramm (wie z.B. AutoCAD oder MicroStation), das auf einfachen geometrischen Elementen wie Linien, Polylinien, Kreisen und Bögen etc. aufgebaut ist, die wiederum die Grundlage für kompliziertere 3D-Objekte darstellen. Je nach Verfahren werden Modelle unterschiedlicher Komplexität erstellt: Kantenmodell, Flächenmodell oder Volumenmodell (Abb. 1.3).

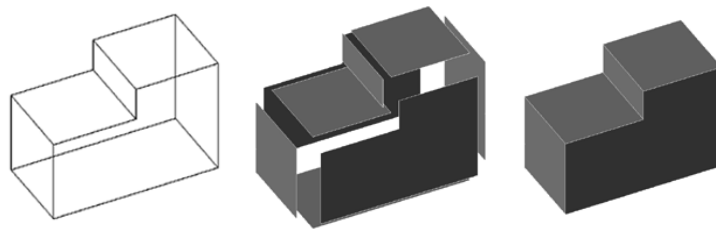


Abb. 1.3: Kantenmodell mit Drahtgeometrie (links), Flächenmodell (Mitte) und Volumenmodell (rechts)

Beim Kantenmodell werden die Körperkanten als gedachte Drahtgeometrie durch eine mathematische Beschreibung abgebildet, Informationen zu Flächen oder Volumen fehlen. Schnittbildungen oder schattierte Ansichten sind nicht möglich. Werden die zwischen den Körperkanten liegenden Flächen mathematisch beschrieben und die Topologie der Flächen mit abgespeichert, dann entsteht ein Flächenmodell, bei dem die Objekte lediglich geometrische Flächen sind. Es enthält nur einzelne Flächen, jedoch keinerlei Informationen darüber, welche Flächen zu welchem Körper gehören. So können zwar Schnittlinien generiert werden, doch keine Schnittflächen, da die Information, wo bei geschlossenen Körpern innen und außen ist, nicht vorhanden ist. Hierfür ist ein Volumenmodell erforderlich. Wenn neben den beschreibenden Flächen eines Körpers die Information gespeichert wird, auf welcher Seite der jeweiligen Fläche sich Material befindet, stellt die Fläche eine Begrenzungsfläche eines Volumens dar. Volumenmodelle, die auch Constructive Solid Geometry (CSG) oder Konstruktive Festkörpergeometrie genannt werden, werden in der Regel aus einfachen Grundkörpern (Würfel, Quader, Pyramide, Zylinder, Kegel, Kugel, Torus), die auch geometrische Primitive genannt werden, durch die Booleschen Operationen Differenz, Vereinigung und Schnittmenge (Abb. 1.4) zusammengesetzt bzw. erstellt. Typischerweise handelt es sich dabei um Körper, deren Oberfläche mittels einer relativ einfachen mathematischen Formel beschrieben werden kann.

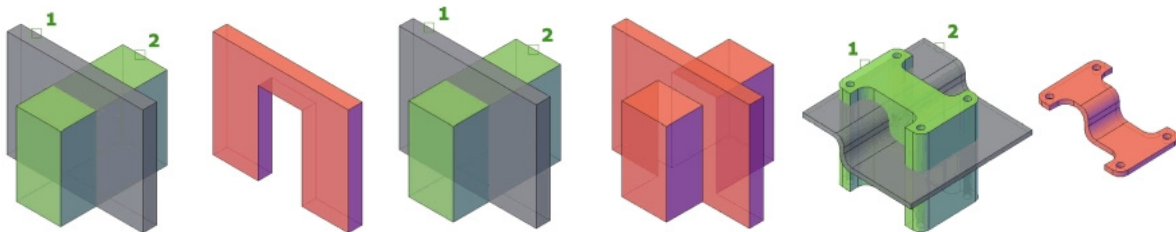


Abb. 1.4: Boolesche Operationen in AutoCAD (Version 2014) zur Bearbeitung von Volumenkörpern: Differenz (links), Vereinigung (Mitte) und Schnittmenge (rechts)

Ein Beispiel für die reine photogrammetrische 3D-Auswertung von Gebäuden mit der Software PICTRAN D der Firma Technet GmbH (Berlin) ist in Abb. 1.5 dargestellt. Die Software erlaubt manuelle Messungen von Punkten, Linien und Polygonen. Aus Gründen der Zuverlässigkeit wurden alle Punkte in mindestens drei Bildern gemessen, die aus unterschiedlicher Perspektive aufgenommen wurden. Als Kontrolle werden in der Software die Epipolarlinien (grün) eingeblendet und zusätzlich wird die Standardabweichung des gemessenen Punktes aus der Berechnung des räumlichen Vorwärtsschnittes angezeigt (Abb. 1.5 rechts unten). Der Datentransfer ist durch eine einfache Schnittstelle über das Fileformat DXF zu dem CAD-Programm AutoCAD gewährleistet. In diesem wird aus den gemessenen 3D-Objektpunkten ein Volumenmodell des Objektes konstruiert. Die Vorgehensweise bei der Modellierung ist in Abb. 1.6 abgebildet. Nach der Generierung des Gebäudegrundrisses werden die einzelnen Fassaden aufgesetzt, in die später die modellierten Einzelobjekte (Fenster, Türen, Gauben, etc.) eingesetzt werden. Dieses Vorgehen bei der photogrammetrischen Erstellung von 3D-Gebäudemodellen in CAD ist u.a. in folgenden Publikationen zusammengefasst: Kersten & Acevedo Pardo 2003; Kersten et al. 2003; Kersten et al. 2004a.

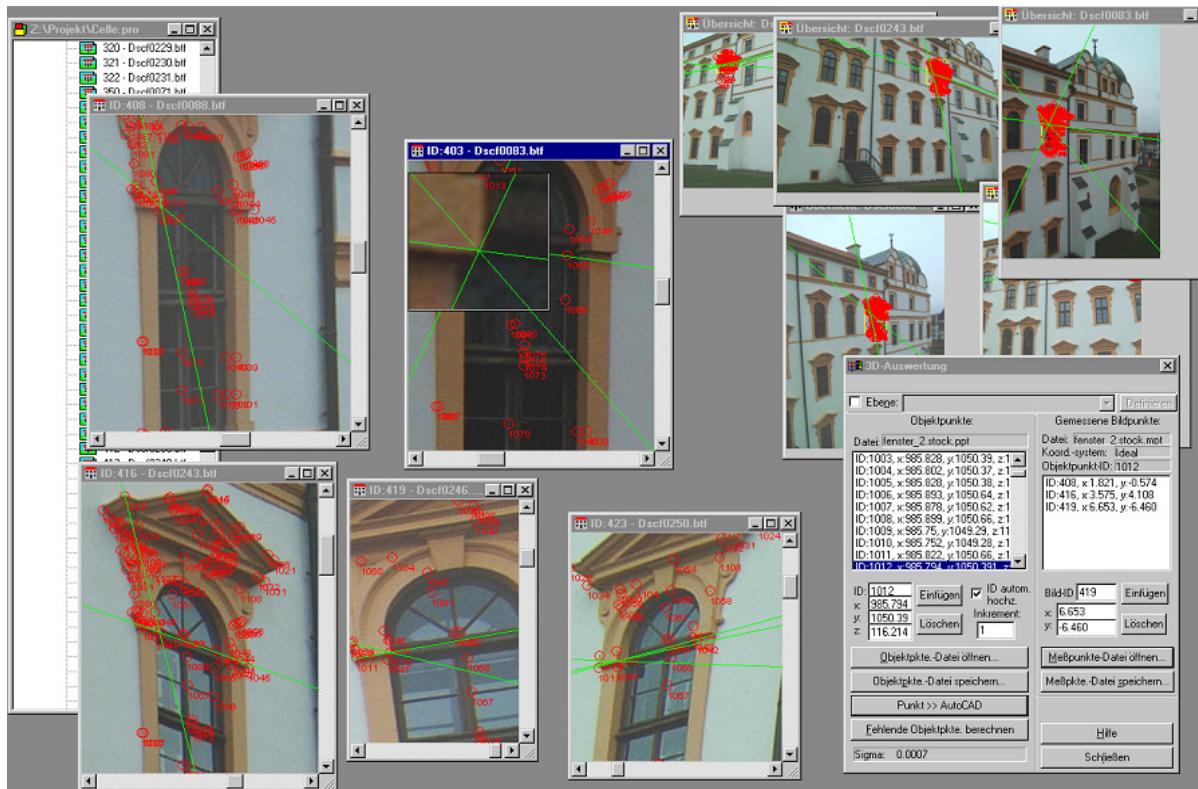


Abb. 1.5: Manuelle photogrammetrische Messungen von diskreten Objektpunkten und 3D-Objektpunktbestimmung durch räumlichen Vorwärtsschnitt in der Software Pictran D



Abb. 1.6: Vom einzelnen Objektteil zum gesamten CAD-Modell - Manuelle 3D-Modellierung mithilfe von diskreten Objektpunkten in AutoCAD

In dem dritten Fachartikel „**Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications**“, veröffentlicht von Kersten (2007) im Heft 2 der Fachzeitschrift *International Journal of Architectural Computing*, wird das Potential der digitalen Photogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings als kombinierte Methode für die geometrische Objektrekonstruktion des Nordportals des historischen Dammes in Marib, Volksrepublik Jemen vorgestellt. Die Objektaufnahme erfolgte im Januar 2006 mit der digitalen Spiegelreflexkamera FujiFine Pix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanner Mensi GS100 während der archäologischen Ausgrabungen der Kommission für Außereuropäische Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts. Das Nordportal wurde anschließend für archäologische Untersuchungen (Bestandsdokumentation der Ausgrabungen) und für touristische Werbe- und Publikationszwecke als 3D CAD-Modell rekonstruiert und visualisiert.

Die dreidimensionale Erfassung und digitale Rekonstruktion einer bedeutenden Kulturerbestätte erfordert aufgrund der komplexen Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Objektes mit der kombinierten Aufnahme und Auswertung durch Photogrammetrie und Laserscanning ein erweitertes Modellierungsverfahren, um ein möglichst realistisches virtuelles Modell aus den Daten generieren zu können. Die kombinierte Auswertung der orientierten Bilder mit den georeferenzierten 3D-Punktwolken des Laserscanners erfolgte mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD Ingenieur-

gesellschaft mbH aus Aachen, das eine MDL-Applikation (MicroStation Development Language) für das CAD-System MicroStation ist. PHIDIAS erlaubt die kombinierte Auswertung der orientierten Bilder mit den georeferenzierten 3D-Punktwolken des Laserscanners. Nach der Bildorientierung und Kamerakalibrierung durch Bündelblockausgleichung konnte in PHIDIAS auf Grund der kombinierten Darstellung von photogrammetrischen Bildern und Laserscannerdaten eine Digitalisierung des Messobjektes mit Hilfe von CAD-Elementen wie Linien, Polygonen oder Flächen direkt auf dem digitalen, orientierten Bild erfolgen. Die Punktmessungen in den orientierten Messbildern lieferten dabei die Lagekoordinaten, während die Tiefenkoordinate des jeweiligen Punktes in den Punktwolken interpoliert wurde. Das Verfahren ist in der Photogrammetrie unter dem Begriff digitales Monoplotting bekannt (Waldhäusl & Hochstöger 1990; Agouris et al. 1994; Becker et al. 2004; Ressler et al. 2006). Aufgrund der Erfahrungen in ähnlichen 3D-Modellierungsprojekten konnte eine sehr effiziente Auswertung wegen der kombinierten Nutzung photogrammetrischer und Laserscannerdaten für eine steingerechte Auswertung erreicht werden. Da in der Archäologie, der Architekturphotogrammetrie und der Denkmalpflege keine sehr hohen Genauigkeiten gefordert sind, erweist sich der Einsatz der kombinierten Methode als besonders effizient.

Als Beispiele für die 3D-CAD-Modellierung mithilfe von reinen Punktwolken sind zwei Anwendungen in den Abb. 1.7 und 1.8 dargestellt. Abb. 1.7 zeigt die 3D-Rekonstruktion des Treppenbaus des Neuwerker Leuchtturms – Hamburgs ältestes noch bestehendes Gebäude – mithilfe einer Punktwolke, die durch terrestrisches Laserscanning generiert wurde (Maziull 2010). In die Punktwolke werden manuell 3D-Polylinien mit der Software AutoCAD eingepasst, die anschließend extrudiert und miteinander verknüpft werden, bis das gesamte 3D-Modell des Objektes erstellt ist. Dabei werden die unterschiedlichen Elemente auf verschiedene Layer gelegt, so dass beim späteren Rendering den Objektteilen die entsprechenden Texturen bzw. Farben zugewiesen werden können.

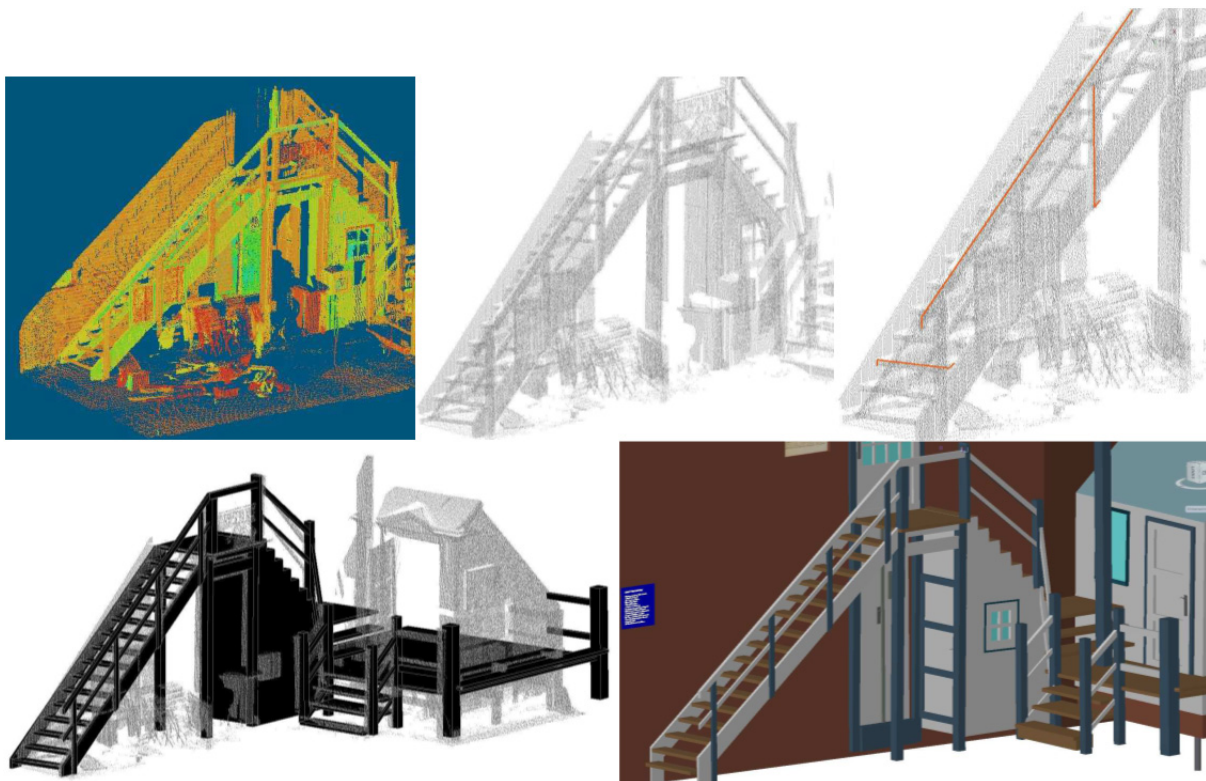


Abb. 1.7: 3D-Modellierung in der Punktwolke – 3D-Punktwolke in RealWorks Survey (oben links) und in AutoCAD (oben Mitte), modellierte 3D-Polylinien in der Punktwolke (oben rechts), rekonstruierte Treppenkonstruktion als 3D-Volumenmodell (unten links) und als gerendertes CAD-Modell (unten rechts) (Maziull 2010)

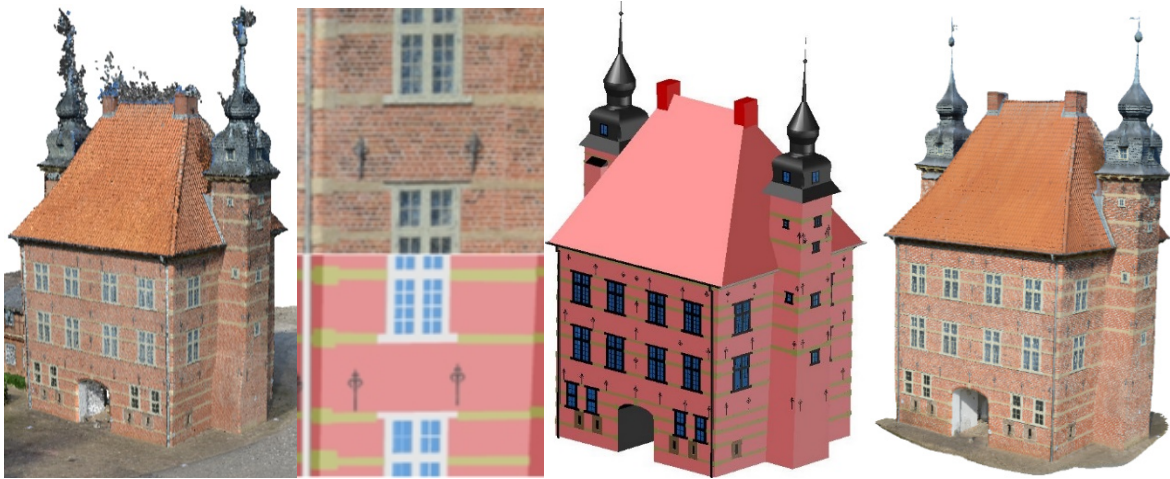


Abb. 1.8: 3D-CAD-Modellierung des Seedorfer Torhauses in bild-basierten Punktwolken aus UAV-gestützter Bildaufnahme – v.l.n.r. unbereinigte 3D-Punktwolke, Ausschnitt Punktwolke und CAD-Modell, CAD-Modell und Dreiecksvermaschung vom Seedorfer Torhaus (Gerdau 2015; Kersten & Lindstaedt 2017)

Ein weiteres Beispiel für die 3D-CAD-Modellierung mithilfe von Punktwolken veranschaulicht das Seedorfer Torhaus in Abb. 1.8. Die Punktwolke wurde in diesem Beispiel aus 215 Bildern einer Kompaktkamera aus der Luft, eingesetzt auf einem Unmanned Aerial Vehicle (Tri-Kopter), und zweier Spiegelreflexkameras (Nikon D800 und D7000) am Boden in Agisoft PhotoScan erstellt (Gerdau 2015; Kersten & Lindstaedt 2017). Die unbereinigte, aber segmentierte Punktwolke umfasst 14,4 Millionen Punkte und dient als Grundlage für die Konstruktion der Gebäudeelemente in AutoCAD. Neben einem CAD-Modell wurde aus der bereinigten Punktwolke eine Dreiecksvermaschung abgeleitet, die anschließend mit den Farbinformationen der Bilder texturiert wurde. Die automatisch erstellte und texturierte Dreiecksvermaschung umfasst als OBJ-File 294 Mbyte, während das manuell erstellte CAD-File eine um den Faktor 11 reduzierte Dateigröße von 27,4 Mbyte besitzt.

Weitere Beispiele für die 3D-Modellierung und Konstruktion von Gebäuden mithilfe von erzeugten Punktwolken durch statisches terrestrisches Laserscanning stellen die Projekte Kaiserdom Königs-lutter (Kersten & Lindstaedt 2012), Alt-Segeberger Bürgerhaus (Kersten et al. 2015b), die Festung Kristiansten in Trondheim, Norwegen (Kersten et al. 2015c) sowie die Selimiye Moschee in Edirne, Türkei (Kersten et al. 2017a) dar (Abb. 1.9).

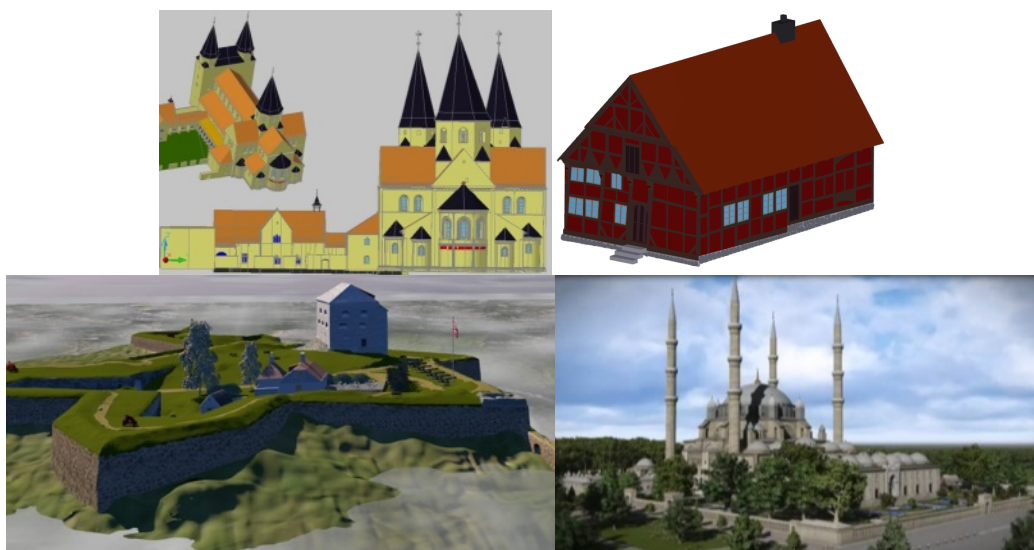


Abb. 1.9: Im CAD konstruierte Gebäude mithilfe von Punktwolken aus statischem terrestrischem Laserscanning: v.l.n.r. Kaiserdom Königs-lutter, Alt-Segeberger Bürgerhaus, Festung Kristiansten in Trondheim, Norwegen und die Selimiye Moschee in Edirne, Türkei.

1.3.3. Mesh Modelling – Objektrekonstruktion durch Dreiecksvermaschung

Neben der Modellierung/Konstruktion von Objekten als CAD-Modelle aus Punktwolken besteht auch die Möglichkeit, Objekte durch Dreiecksvermaschung (Mesh Modelling) zu modellieren. Gerade für unregelmäßige Objektoberflächen bietet sich die Aufnahme und Modellierung durch Punktwolken an, da gerade für komplexe Oberflächen oft eine Erstellung eines CAD-Modells zu aufwändig und damit zu kostenintensiv wäre. Generell bieten sich dem Anwender je nach Softwarelösung zwei unterschiedliche Methoden der Dreiecksvermaschung: die 2,5D- und die 3D-Triangulation. Für eine 2,5D-Vermaschung wird eine Projektionsoberfläche (z.B. Ebene, Kugel oder Zylinder) benötigt, die dem Objekt in grober Form ähnelt. Komplexere Oberflächen, die sich nicht durch Regelgeometrien annähern lassen, können durch eine 3D-Triangulation modelliert werden, in dem die Approximation der Oberfläche durch kleine Ebenenstücke erfolgt.

Die Software-Lösungen der Laserscanning-Systemhersteller bieten zum Teil auch die Möglichkeit einer Dreiecksvermaschung der erfassten Punktwolke. Doch gerade bei dieser Art von Datenprozessierung gibt es eine Vielzahl von funktionellen Softwarepaketen von Drittanbietern, die oftmals aus dem Bereich des Rapid Prototypings kommen und in denen jahrelange Entwicklungsarbeit zur Punktwolkenvermaschung und teilweise auch zur Flächenrückführung stecken: PolyWorks (InnovMetric Software Inc.), Geomagic (3D Systems), Reconstructor (JRC), QTSculptor (Polygon Technology GmbH, Darmstadt) und die frei verfügbaren Programme MeshLab (Visual Computing Lab of ISTI - CNR, Pisa) sowie CloudCompare (<http://www.danielgm.net/cc/>). In einem Vergleich verschiedener Softwarepakete wurde am Beispiel der Modellierung der Langen Anna auf Helgoland (Felsen) durch Lindstaedt & Kersten (2005) bereits im Jahr 2005 aufgezeigt, dass bei diesem Objekt unter den untersuchten Softwarepaketen PolyWorks das beste Vermaschungsergebnis lieferte. Auch bei einem Vergleich von triangulierten griechischen Inschriften, die mit einem Triangulationsscanner aufgenommen wurden, zeigte PolyWorks gegenüber Geomagic ein deutlich besseres Resultat (Remondino et al. 2008). Neuere Untersuchungen zu Vergleichen von Punktwolken mit der Software 3DReShaper, CloudCompare und Geomagic Studio bzw. Geomagic Control veröffentlichten Holst et al. (2016). Die Methode der Dreiecksvermaschung in den Auswertprogrammen wird oft nicht veröffentlicht, aber der Anwender kann davon ausgehen, dass es sich oftmals um eine Delaunay-Triangulation (Delaunay 1934; Lee & Schachter 1980) handelt.

In dem vierten Fachartikel „**Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai**“, veröffentlicht von Kersten et al. (2009) im Heft 1 der Fachzeitschrift *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, wird die geometrische Objektrekonstruktion von Steinfiguren der Osterinsel (Chile) durch Dreiecksvermaschung vorgestellt, die auf Daten von terrestrischen Laserscans basieren. Da die seit 1995 als Weltkulturerbe der UNESCO (Organisation für Ausbildung, Wissenschaft und Kultur der Vereinten Nationen) unter Schutz stehenden sehr großen vulkanischen Steinfiguren der Osterinsel bis 2007 noch nie digital mit einer geeigneten Aufnahmetechnik erfasst und dokumentiert wurden, scannte das Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg (HCU) in Zusammenarbeit mit der Kommission für Außereuropäische Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) in Bonn bis 2011 ca. 50 wieder aufgestellte Steinfiguren (Moai) mit verschiedenen terrestrischen Laserscannern. Die Moai sind in zunehmendem Maße der Gefahr einer Beschädigung durch Erosion von Wind und Regen, durch freilaufende Pferde sowie durch Vandalismus ausgesetzt. Um die Scanzeiten nicht zu lang und die Datenmenge für damalige Verhältnisse nicht zu groß werden zu lassen, wurden die Moai überwiegend mit einem Punktabstand von unter einem Zentimeter auf 10 m Entfernung gescannt. Die wiederholte Aufnahme ausgewählter Statuen durch terrestrisches Laserscanning und das anschließende Modellieren der Punktwolken durch Dreiecksvermaschung in Geomagic Studio diente auch als Grundlage für eine Analyse potentieller Deformationen und für eine Überwachung möglicher geplan-

ter Konservierungsmaßnahmen. Dafür wurden an den jeweiligen Aufnahmeorten Festpunkte markiert, eingemessen und in einem lokalen Koordinatensystem, allerdings mit Bezug zum Landeskoordinatensystem von Chile und ohne dabei die übergeordneten Fehlereinflüsse zu integrieren, bestimmt. Jedoch konnten in den Untersuchungen keine signifikanten Änderungen an den Steinfiguren für den kurzen Zeitabstand einiger weniger Jahre ermittelt werden.

Da das terrestrische Laserscanning große Datenmengen durch die Aufnahme von zig Millionen Punkten erzeugt, entsteht der Bedarf, die Datenmengen durch Filterung oder spätestens bei der Dreiecksvermaschung der modellierten Objekte zu reduzieren. Untersuchungen über die krümmungsbasierte Datenreduktion von vermaschten Modellen des Bismarckdenkmals in Hamburg haben gezeigt, dass bei glatten Oberflächen die Polygone mit der Software Geomagic Studio auf 10% reduziert werden können, ohne die geometrische und visuelle Qualität der Dreiecksvermaschung signifikant zu beeinträchtigen (Kersten et al. 2010). Allerdings gilt dieses Erkenntnis bei rauen Oberflächenstrukturen nicht, denn bei den Steinfiguren dürfen die Daten höchstens bis zu 25% reduziert werden, wie spätere Untersuchungen ergeben haben, wenn man nicht signifikante Strukturen der Oberfläche verlieren möchte (Abb. 1.10).

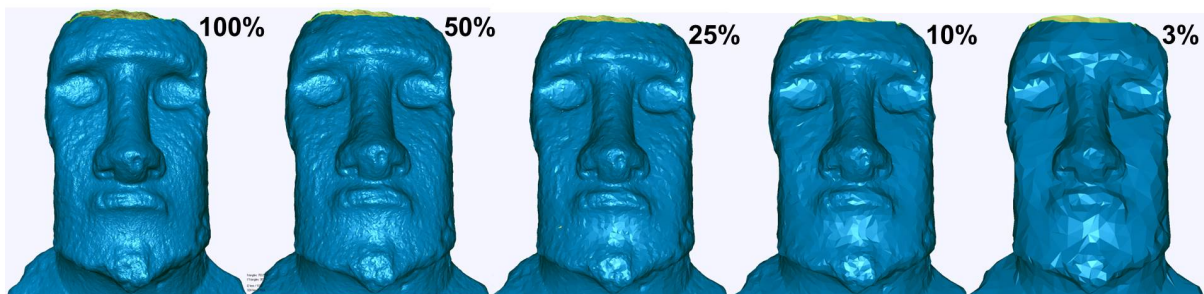


Abb. 1.10: Dreiecksvermaschung eines Moai-Kopfes in verschiedenen Auflösungen bzw. in unterschiedlichen Stufen der Polygonezimierung – Ergebnis: maximale Reduktion um Faktor 4 akzeptabel

1.4. Geometrische Objektmodellierung auf Basis von Punktwolken kinematischer Scans

Seit Beginn der 2000er Jahre haben sich mobile Datenaufnahmesysteme in der Vermessung etabliert. Der stetig zunehmende Bedarf an 3D-Geodaten forderte technische Lösungen für eine schnelle Datenerfassung und -auswertung. Insbesondere in urbanen Gebieten resultieren aus schnellem Wandel erhöhte Anforderungen an verfügbare 3D Daten. Neben der schnellen Bereitstellung solcher 3D-Daten sind als weitere Kriterien die hohe Genauigkeit, der Detailreichtum, die Aktualität, die Vollständigkeit, die einfache Handhabung und die günstigen Herstellungskosten zu nennen. Die rasante technologische Entwicklung in der Sensorik und der Computertechnik ermöglichte die Erarbeitung von entsprechenden Lösungen. In den letzten 15 Jahren wurden daher zunehmend Multi-Sensor-Systeme auf Fahrzeugen von Hochschulen (z.B. University of Calgary, Kanada und Universität der Bundeswehr in Neubiberg) und später von Systemherstellern (z.B. der Streetmapper von IGI mbH, Kreuztal und 3D Laser Mapping, Nottingham, England sowie iNovitas AG, Muttenz, Schweiz) entwickelt, bei denen der terrestrische Laserscanner und später Stereokameras eine zentrale Rolle für die Datenerfassung von Punktwolken darstellten. Grundlage solcher Multi-Sensor-Systeme sind Sensoren für die Positionsbestimmung (Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation Systems/Units, Odometer, Trackingsysteme basierend auf Totalstationen), für die 3D-Datenerfassung (Laserscanner und Kameras) und für die Zeitsynchronisierung der Sensoren (PPS-Signale durch GNSS). Heute sind solche Multi-Sensor-Systeme auf vielen mobilen Plattformen einsetzbar: auf einem Fahrzeug, auf einem Fahrrad, auf einer Eisenbahn, auf Trolleys, auf einem Unmanned Aerial Vehicle, auf dem Schiff und sogar als tragbares System durch den Menschen. Daher spricht man heute auch vom

mobilen oder kinematischen terrestrischen Laserscanning, wenn solche Erfassungssysteme in Kombination mit den entsprechenden Positionssensoren auf diversen Plattformen im Einsatz sind. Kinematisch hat seinen Ursprung im dem griechischen Wort kinema, das übersetzt Bewegung heißt, während Kinematics die Wissenschaft über die räumliche Bewegung von Punkten und Körpern darstellt. Aus ingenieurgeodätischer Sicht verstehen sich kinematische Sensor-Systeme als sich bewegende Messsysteme, bei denen sich die Messwerte mit einem Zeitstempel versehen lassen.

In dem fünften Fachartikel „**Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning**“, veröffentlicht von Kersten et al. (2009) im Heft 126 der Fachzeitschrift *The Photogrammetric Record*, wird die detaillierte und geometrisch umfassende Dokumentation der Historischen Halbinsel von Istanbul (Türkei) durch das mobile bzw. kinematische terrestrische Laserscanning vorgestellt. Dabei wird auch der technische Stand im Bereich des kinematischen terrestrischen Laserscannings im Jahr 2009 zusammengefasst, der sich von dem heutigen Stand signifikant in der Hinsicht unterscheidet, dass die Systeme in den letzten acht Jahren schneller, stabiler, kompakter, genauer, leichter integrierbar und je nach Sensorkonfiguration teilweise kostengünstiger geworden sind. Einen aktuellen Überblick über mobile Multi-Sensor-Systeme geben DVW (2014) und Schwarz (2017).

Für die Erfassung und Dokumentation der Historischen Halbinsel in Istanbul, die ungefähr 48000 Gebäude auf einer Fläche von 1500 ha umfasst (Fig. 1, S. 87), war im Jahr 2007 ein recht kurzer Zeitraum von zwei Jahren vorgesehen. Als Grund für die schnelle Kartierung der Historischen Halbinsel wurde angeführt, dass in den nächsten 30 Jahren ein verheerendes Erdbeben in Istanbul aufgrund der Plattentektonik in der Türkei erwartet wird. Nachdem in den ersten sechs Monaten des Projektzeitraumes nur 80 ha durch statisches terrestrisches Laserscanning mit den verfügbaren Ressourcen an Personal und Laserscannern gescannt wurden, musste die Strategie zur Erfassung der Daten geändert werden und es wurde eine neue Produktionsumgebung etabliert, die als zentrale Erfassungsmethode das kinematische terrestrische Laserscanning beinhaltete. Die erfassten Laserscanningdaten wurden anschließend verwendet, um die Gebäudefassaden im Maßstab 1: 200 in 2D zu kartieren, während in digitalen Farbluftbildern, die mit einer Auflösung von 21 µm gescannt wurden, die Dächer der Gebäude in 3D erfasst wurden, um sie mit 3D-Daten aus dem Laserscanning zu 3D-Gebäudemodellen fusionieren. Für die mobile Datenerfassung wurde das Mobile Mapping Fahrzeug der schwedischen Firma VISIMIND AB aus Stockholm eingesetzt, in dem neben dem terrestrischen Laserscanner Leica HDS 4500 (entspricht dem Laserscanner IMAGER 5003 von Zoller + Fröhlich) ein Global Positioning System (GPS) und eine Inertialmesseinheit (IMU) für die Sensorpositionierung sowie digitale Kameras für die Bilderfassung eingesetzt wurden (Fig. 4, S. 91). Mit dem Laserscanner wurden in der laufenden Bewegung des Fahrzeugs bei einer sehr langsamen Geschwindigkeit von bis zu drei km/h anfangs 25 und später 40 Scanprofile pro Sekunde aufgenommen, was einem Profilstand von 2-3 cm entsprach. Da die GPS-Signale sehr oft in den engen belebten Straßen von Istanbul aufgrund der Gebäudehöhen abrissen und viele an den Fassaden platzierte und eingemessene Passpunktsignale zerstört waren, konnte eine Positionierung des terrestrischen Laserscanners während der Fahrt für bestimmte Abschnitte in der Stadt nicht berechnet werden. Daher mussten nachträglich natürliche Punkte an den Fassaden als Passpunkte, die mit Totalstationen aufwendig eingemessen wurden, oder die Bilddaten der Kameras durch adaptierte Trackingalgorithmen für die Positionierung der Scans im Postprocessing verwendet werden. Durch den Einsatz des mobilen Multi-Sensor-Systems konnte die Datenerfassung der Fassaden in den Straßen innerhalb von ca. drei Monaten fast komplett abgeschlossen werden, was einer Leistung von ca. 600 m/h entsprach. Für die Auswertung wurden neben den Scanpunktewolken und den Bildern der seitwärts vertikal und horizontal schauenden Kameras des mobilen Sensorsystems auch separat mit einer kalibrierten Nikon D70s aufgenommene Bilder der Gebäudefassaden durch digitales Monoplotting mit der Software Z-MAP Laser der Firma Menci Software (Arezzo, Italien) verarbeitet. Mit zunehmendem Projektfortschritt stellte sich

heraus, dass die Grauwerte (Intensitätswerte) der Punktwolken für eine Interpretation der zu erfassenden Informationen bei der Fassadenkartierung oft ausreichten. Ein erstellter Fassadenplan aus Punktwolke und photogrammetrischen Bildern ist in Fig. 11 (S. 96) dargestellt. Die Auswertegeschwindigkeit konnte trotz der effizienten Auswertung durch Monoplotting mit dem Tempo der Datenerfassung nicht mehr mithalten, d.h. die eingesetzten Operateure haben durchschnittlich 60-140 m² Fassadenfläche pro Tag kartiert, obwohl das Postprocessing der Scandaten bis zum Einsatz für die Kartierung ein Verhältnis 1:10 (Zeit für Scanning zu Postprocessing) benötigte. Eine weitere Herausforderung stellte in dem Projekt die Verschmelzung von den aus Luftbildern mit der Software Z-Map Photo generierten 3D-Daten der Dachstrukturen mit den in Laserscans erfassten 3D-Polylinien der Fassadenstrukturen dar. Untersuchungen in verschiedenen Testgebieten haben gezeigt, dass zwischen den unterschiedlich erfassten Daten Abweichungen zwischen 18 und 112 cm vorlagen.

In den letzten zehn Jahren hat sich das Potential terrestrischer Laserscanner auch für hydrographische Anwendungen z.B. zur Vermessung von Flussuferbereichen, Küstengebieten und Hafeninfrastrukturanlagen auf Multi-Sensor-Schiffen durchgesetzt.

In dem sechsten Fachartikel „**Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser**“, veröffentlicht von Kersten et al. (2011) im Heft 10 der Fachzeitschrift *AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, wird die Integration eines terrestrischen Laserscanningsystems (TLS) auf einem schiffs-basierten Multi-Sensor-System zur simultanen Erfassung von 3D-Geodaten über und unter Wasser vorgestellt. Ein Laserscanner wie z.B. der Riegl VZ-400 erfasst die Topographie über Wasser mit einem Laser im Nahen Infrarot, während ein Fächerecholot wie z.B. das Reson Seabat 8101 die Unterwasser-Topographie mit akustischen Signalen scannt. Der Riegl VZ-400 erreicht mit einer Messrate von 3-120 Linien/Sekunde im Profilmodus eine maximale Reichweite von 500 m (42000 Punkte/Sekunde), was einen Punktabstand von bis zu 0,4 cm auf 100 m Entfernung bedeutet. Dagegen hat das Fächerecholot eine Reichweite von 300 m (150° Fächerbreite, Messrate bis 40 Hz) und erreicht Punktabstände von 1.3m auf einer Entfernung von 50 m. Mit der Beschaffung des terrestrischen Laserscanningsystems Riegl VZ-400 für die HafenCity Universität Hamburg im Jahre 2009 war auch die Idee verbunden, das Messsystem in das vorhandene Multi-Sensor-System auf dem eigenen Vermessungsschiff Level-A zu integrieren. Erste Untersuchungen wurden bereits auf der Level-A mit dem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5006i von Zoller + Fröhlich durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass der IMAGER 5006i mit seiner kurzen Reichweite von 79 m für viele hydrographische Anwendungen nicht geeignet ist und dass das eingesetzte Inertial Navigation System IXSEA OCTANS über keine ausreichende Genauigkeit zur Kurswinkelbestimmung (0,17°) verfügt, was sich mit einer Abweichung von 0,24 m deutlich auf die Messgenauigkeit der Koordinaten in 79 m Entfernung auswirkt (Böder et al. 2010). Daher wurde in Zusammenarbeit mit der Hamburg Port Authority (HPA) der Riegl VZ-400 (Reichweite zwischen 300-500 m je nach Reflektivität) auf dem Vermessungsschiff Deepenschriewer III der HPA über eine Schnittstelle mit einem entsprechenden Treiber in der hydrographischen Aufnahmesoftware QINSy (**Quality Integrated Navigation System**) der Firma QPS (**Quality Positioning Services B.V.**) aus den Niederlanden in das Multi-Sensor-System integriert, so dass die Punktwolken des Laserscanners mit den Daten eines Fächerecholotes (Reson SeaBat 8101) in Echtzeit und auch im Postprocessing fusioniert werden konnten. Die Positionierung der Aufnahmesensoren (3D-Position und Lagewinkel) wurde mithilfe des genaueren inertialen Sensors IXSEA HYDRINS (Heading bei $1\sigma \pm 0.034^\circ$, Roll/Pitch bei $1\sigma \pm 0.01^\circ$) in Kombination mit einem GNSS-Empfänger TRIMBLE SPS851H (Korrekturdaten vom Dienst Trimble VRS-NOW) in Echtzeit bereitgestellt, während die Zeitsynchronisierung der Sensoren über das PPS-Puls des an Bord befindlichen GNSS-Sensors realisiert wurde. Der Aufbau des Multi-Sensor-Systems auf dem Vermessungsschiff Deepenschriewer III ist in Abb. 2 (S. 106) dargestellt.

Nach geodätischer Einmessung der Sensoren in das Koordinatensystem des Schiffs und der Verknüpfung der Sensoren an Bord zu einem integrierten System über LAN, RS-232 und USB-Verbindungen erfolgte die Systemkalibrierung des Scanners (Bestimmung der Lagewinkeloffsets) durch entsprechende Messfahrten des Schiffs in Hin- und Rückfahrt an markanten Gebäuden und Molen vorbei. Anhand der Scandaten konnten die Lagewinkeloffsets in der Software QINSy bestimmt werden, so dass die Korrekturen in Echtzeit an die nachfolgenden Scandaten angebracht werden konnten. Um systematische Effekte in den kinematisch aufgenommenen Laserscanningdaten zu detektieren, wurden anhand von verschiedenen Testdaten Genauigkeitsuntersuchungen vorgenommen. Dazu wurden im Grasbrookhafen (nahe der neuen Elbphilharmonie in Hamburg) drei Scanprofile von West nach Ost und umgekehrt aufgenommen. Die Datensätze der gleichen Profilrichtungen passten auf 1-2 cm zusammen, während beim Vergleich der Daten in entgegengesetzter Richtung Abweichungen von bis zu 7 cm in der Lage und 4-5 cm in der Höhe bestimmt wurden. Diese Abweichungen sind systematisch, da die Koordinaten des abweichenden Profils stets weiter vom Schiff entfernt lagen. Ursache dieser Abweichung könnte eine um 3,5 cm quer zur Längsrichtung des Schiffes fehlerhafte Einmessung der Sensoren an Bord sein, was jedoch durch Postprocessing der Daten in der Software QINSy kalibriert werden konnte. Bei späteren praktischen Genauigkeitsuntersuchungen mit dem integrierten Laserscanner Riegl VZ-400 auf dem HCU-Vermessungsschiff Level-A konnten Genauigkeiten von 2-3 cm in Lage und Höhe nachgewiesen werden (Kersten et al. 2013).

Für weitere Genauigkeitsuntersuchungen wurden statisch aufgenommene Laserscanningdaten herangezogen, für die von der gegenüberliegenden Seite des Grasbrookhafens die Gebäudefassaden aus einer Entfernung von 90-150 m gescannt wurden. Beim Vergleich von ausgewählten Flächen an den Gebäuden wurde eine geringe Differenz von ± 1 cm zwischen den Referenzdaten und den aus 35-65 m Distanz mobil erfassten Scandaten festgestellt. Während die beiden Datensätze in den unteren Bereichen der Gebäude recht gut zusammenpassten (Abb. 1.11 links), wurden kleinere höhenabhängige systematische Effekte ab 30 m Gebäudehöhe sichtbar, da dort die mobilen Daten deutlich um die Referenzdaten schwankten (Abb. 1.11 rechts).

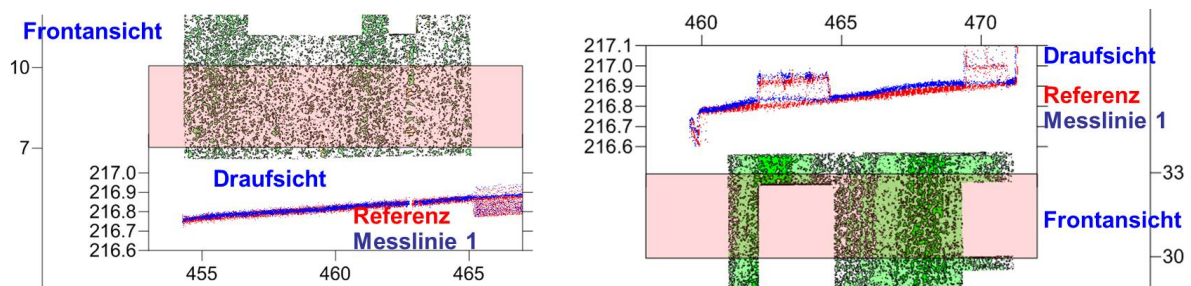


Abb. 1.11: Genauigkeitsuntersuchung zwischen Referenzdaten statischer Scans (rot) und kinematisch erfasstem Scanprofil (blau: Messlinie 1) in der Front- und Draufsicht eines Gebäudes im Grasbrookhafen Hamburg – Bei geringeren Gebäudehöhen passen Datensätze zusammen (links), ab Gebäudehöhen von 30 m schwingen die mobilen Daten um die Referenzdaten (rechts).

Um diese systematischen Bewegungseffekte detaillierter zu analysieren, wurde mit den Docklands im Hamburger Fischereihafen (Abb. 10, S. 108) ein weiteres Testobjekt aufgenommen. An den horizontalen Gebäudeliniien konnten wiederum schwingende Bewegungseffekte detektiert werden, die durch einen Zeitfehler in einem verwendeten Protokoll der Bewegungsdaten der inertialen Messeinheit IXSEA HYDRINS von +25ms verursacht wurden. Dieser Fehler wirkt sich insbesondere auf den Rollwinkel und damit auf die Höheninformation bei der Gebäudeaufnahme aus. Nach Korrektur der falschen Zeitsynchronisierung wurden die Scans um die systematischen Effekte bereinigt.

Nach Beseitigung systematischer Effekte durch eine präzise Systemkalibrierung und bei Verwendung sehr genauer Positionierungssensoren können mit den mobilen Messsystemen 3D-

Punktgenauigkeiten von 1-2 cm erreicht werden, die für die meisten Modellierungs- und Rekonstruktionsaufgaben bei der Dokumentation urbaner Räume ausreichend sein werden.

1.5. Punktwolken durch photogrammetrische Verfahren

Dichte Punktwolken liefern heute je nach Objektgröße und Genauigkeitsanforderungen das airborne und terrestrische Laserscanning, das kinematische terrestrische Laserscanning, Streifenprojektionssysteme und Time-of-Flight Kameras. Seit einigen Jahren können dichte Punktwolken auch aus Bilddaten digitaler Kameras und Luftbildkameras sowie Lichtfeldkameras abgeleitet werden. Während aktuelle Time-of-Flight Kameras noch sehr stark in Reichweite (in der Regel bis max. 40 m) und Genauigkeit (ca. 0.5-4 cm) limitiert sind (Piatti & Rinaudo 2012; Remondino & Stoppa 2013), liefern digitale Kameras qualitativ hochwertige Bilddaten zur Erstellung von dichten Punktwolken (Wenzel et al. 2013; Remondino et al. 2014.; Kersten et al. 2014; Kersten & Lindstaedt 2017a; Kersten & Lindstaedt 2017b). Die bildbasierten Verfahren zur Generierung von Punktwolken haben seit Ende der 2000er Jahre kontinuierlich zugenommen und sich im Markt wieder zu einem konkurrierenden oder ergänzenden Verfahren zum stark verbreiteten Laserscanning entwickelt (Remondino et al. 2014). Da die Algorithmen durch die rasante Entwicklung in der Leistungsfähigkeit von Computern profitieren, werden die vielen verfügbaren Software-Tools zusammen mit den hochwertigen digitalen Kameras (wie z.B. einer Nikon D800 mit 36 Mio. Pixel) zu flexiblen, effizienten und kostengünstigen Messsystemen. Eine aktuelle und weitestgehend komplette Übersicht von verfügbaren und in der Photogrammetrie genutzten Softwarepaketen ist in Kersten & Lindstaedt (2012) und Kersten & Lindstaedt (2017a) zusammengestellt. Da die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Bildorientierung und der Kamerakalibrierung die Qualität aller folgenden Prozesse, wie die Bestimmung des 3D-Punktes und die nachfolgende 3D-Modellierung, erheblich beeinflussen (Luhmann et al. 2014), muss ein kritischer Fokus auf diese essentiellen Prozesse gelegt werden. Luhmann et al. (2015) beschreiben die Sensormodellierung und die Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Remondino et al. (2012) stellen einen kritischen Überblick und eine geometrische Bewertung von einigen Softwarepaketen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken aus Bilddaten vor. Dafür sind verschiedene Datensätze mit bekannter Geometrie großer und komplexer 3D-Szenen, mit genauen Passpunkten, kalibrierten Kameras und Maßstäben verwendet worden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Structure-from-Motion (SfM)-Verfahren bei komplexen und langen Bildsequenzen Probleme hinsichtlich Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit aufweisen. Aus photogrammetrischer Sicht kann die Fehlerquelle der Bündellösung auch darin begründet sein, dass SfM oft nur wenige Parameter der inneren Orientierung (z.B. 1-2 Parameter für die radial-symmetrische Verzeichnung, manchmal Bildhauptpunkt) für jedes Bild berechnet. Aktuelle Softwarepakete wie Agisoft PhotoScan und Pix4D Mapper, die heute aus Sicht der Photogrammeter eine einwandfreie Modellierung der systematischen Bildfehler durch eine strenge Kamerakalibrierung, vorwiegend basierend auf den Kameraparametern von Brown (1971), garantieren, haben sich im Vermessungsbereich bzw. im 3D-Mapping etabliert. Gerade der zunehmende Einsatz von bildbasierten Verfahren mit Unmanned Aerial Vehicles or Systems (UAV/UAS) hat die Entwicklung der Auswertesoftware hinsichtlich stabiler Bildorientierung und zuverlässiger Kamerakalibrierung in den letzten Jahren signifikant gefördert. Veröffentlichungen über erfolgreiche praktische Einsätze von UAVs in verschiedenen Anwendungsgebieten gibt es mittlerweile viele (siehe DVW-Seminare UAV 2016 und 2017 sowie die Tagungen UAV-g 2011, 2013, 2015 und 2017), jedoch sei hier stellvertretend die Publikation von Kersten & Lindstaedt (2017a) aufgeführt, die die Entwicklung und zunehmende Bedeutung von UAVs im Vermessungsbereich aufzeigt und anhand von verschiedenen Beispielen den automatischen Workflow bei der Auswertung von UAV-gestützten Bildflugdaten präsentiert.

Dennoch stellen sich auch hier für den Anwender die Fragen, welches Genauigkeitspotential können bildbasierte Aufnahme- und Auswerteverfahren erreichen, in welchen Genauigkeitsbereich können

diese Messsysteme eindringen und welche Softwareprodukte liefern qualitativ hochwertige bzw. gute und zuverlässige Resultate? In dem siebten und letzten Fachartikel „**Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services**“, von Kersten & Lindstaedt (2012) veröffentlicht im Heft 6 der Fachzeitschrift *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, wird das Genauigkeitspotential verschiedener Softwarepakete zur Generierung von Punktwolken und zur nachfolgenden 3D-Objektrekonstruktion in unterschiedlichen Anwendungsbereichen evaluiert. Anhand von diversen Kulturobjekten (historische Gebäude, Statuen/Figuren, archäologische Fundstücke, etc.) wird in diesem Artikel das Potential von Webservices (Microsoft Photosynth und Autodesk Photofly bzw. 123D Catch Beta) und von frei verfügbaren Softwarepaketen (Bundler/PMVS2 und VisualSFM) aufgezeigt, mit denen 3D-Punktwolken oder Oberflächenmodelle (als 3D-Polygone) mit foto-realistischer Textur automatisch aus Bilddaten erzeugt werden. Für die Kamerakalibrierung verwendet Bundler die Brennweite f aus den EXIF-Daten und radialsymmetrische Verzeichnungsparameter k_1 und k_2 , während in VisualSFM folgende Parameter verwendet werden: (a) Kamerakonstante (in Pixel) automatisch als Näherung aus den EXIF-Daten, (b) Bildhauptpunkt für jedes Bild im Bildzentrum angenommen (außer bei vorgegebener Kalibrierung) und (c) nur ein Parameter der radialsymmetrischen Verzerrung. Bei den beiden eingesetzten Webservices gibt es keine detaillierten Informationen über die genutzten Kamerakalibrierungsparameter, aber es ist zu vermuten, dass Microsoft Photosynth die gleichen Parameter wie Bundler verwendet, zumal es auf der Entwicklung von Bundler beruht. Mit diesen vier Softwarepaketen wurden Bildverbände von 3D-Objekten unterschiedlicher Größe aus den Anwendungsfeldern Architektur (Gebäudefassaden), Denkmalpflege (Skulpturen) und Archäologie (Fundstücke) berechnet, aus denen dann Punktwolken und die 3D-Rekonstruktion der Objekte abgeleitet wurden. Die Bildverbände wurden überwiegend mit den digitalen Spiegelreflexkameras Nikon D90 (4288 × 2848 Pixel) und Nikon D70 (3008 × 2000) aufgenommen (Tab. 1, S. 116). Die Objektaufnahme mit einer digitalen Spiegelreflexkamera in Kombination mit verschiedenen Objektiven ist einfach, sehr schnell, sehr flexibel und sehr kostengünstig. Als Referenz für die 3D-Vergleiche standen Daten von einem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5006h bzw. 5006i und einem Streifenprojektionssystem Breuckmann OptoTOP-HE zur Verfügung.

Das gesamte bildbasierte Aufnahme- und Modellierungsverfahren ist weitgehend automatisiert und funktioniert auch ohne Zielmarken als Passpunkte, wenn bei kleineren Objekten kalibrierte Maßstäbe zur Objektskalierung ausreichen. Die Qualitätsfaktoren der 3D-Modelle als Ergebnisse werden durch den Bildmaßstab, die Beleuchtung, die Objekttextur, das Messrauschen und durch die Dreieckvermischung beeinflusst. Die hier erzielten Ergebnisse zeigten, dass die open-source Software Bundler/PMVS2, VisualSFM und der Webservice Photofly bzw. 123D Catch Beta ähnliche 3D-Modelle wie aus den Punktwolken von terrestrischen Laserscannern bzw. Streifenprojektionssystemen erzeugen konnten. Bei den 3D-Vergleichen zeigte sich jedoch, dass die durchschnittlichen Abweichungen zur Referenz bei den größeren Objekten im Zentimeterbereich lagen, während sie bei kleinen Objekten nur um maximal einen Millimeter differierten (Tab. 2, S. 123). Allerdings ist bei den Ergebnissen mit den getesteten Softwarepaketen nicht immer eine hohe Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit garantiert. Die Ergebnisse von Photosynth waren wegen der dünnen Punktwolken für eine Modellierung nicht zu gebrauchen. Bundler/PMVS2 lieferte je nach Materialeigenschaften der Objekte und je nach Beleuchtungssituation während der Aufnahme teilweise verrauschte Punktwolken, die dann für eine Modellierung nicht zu gebrauchen waren. Photofly/123D Catch Beta erstellt visuell sehr attraktive 3D-Modelle, wenn die Objekte eher klein und rund sind. Die generierten Modelle sind sogar leicht geglättet und kleine Löcher werden automatisch durch die Software geschlossen. Bei größeren Objekten mit scharfen Kanten sind die Resultate geometrisch nicht korrekt, aber ggf. immer noch für Visualisierungen im Internet zu gebrauchen.

Die Softwarepakete Bundler/PMVS2, VisualSFM und der Webservice 123D Catch wurden im Vergleich mit der kommerziellen low-cost Software Agisoft PhotoScan (V 1.0.4) bei der Modellierung eines größeren Objektes, nämlich des arabischen Forts in der Wüste von Al Zubarah (Katar) getestet (Kersten et al. 2015a). Das quadratische Fort mit seinen vier Ecktürmen wurde im Innenbereich mit einem Bildverband von 219 Fotos und außen mit 176 Bildern mit einer Nikon D70 in Kombination mit einem Nikkor-Zoomobjektiv (Brennweite 35 mm) im September 2011 aufgenommen. Als Referenzdaten standen die Punktwolke bzw. das vermaschte 3D-Modell vom terrestrischen Laserscanner Z+F IMAGER 5006h zur Verfügung. Bei diesen Untersuchungen konnten die getesteten Softwarepakete die geometrische Qualität und Vollständigkeit der Ergebnisse vom terrestrischen Laserscanning nicht erreichen. Während Bundler/PMVS2 und VisualSFM durchschnittliche Abweichungen von 5 cm bis 10 cm aufwiesen, zeigte Agisoft PhotoScan mit durchschnittlichen Abweichungen von 2 cm das beste Ergebnis. Dabei profitierte PhotoScan von den genauen Bildpunktmessungen der verfügbaren Passpunkte und der anschließenden stabilen Bündelblockausgleichung. Mit der anderen Software ist eine Passpunktmessung für eine 3D-Transformation nur in der 3D-Punktwolke möglich, was aufgrund der geringen Punktdichte um ein Zielzeichen nicht sehr genau ist. Durch den Einsatz einer höher auflösenden Kamera und eines Unmanned Aerial Systems hätten eine bessere Aufnahmekonfiguration des Bildverbandes und damit bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Ein wesentlicher Aspekt in der Auswertung der Bilddaten ist jedoch die Zeit. Werden als Beispiel die 176 Fotos des Außenbereiches um das Fort Al Zubarah herum betrachtet, dann dauert die Generierung der Punktwolke in VisualSFM (tlw. auf der Graphic Processing Unit - GPU) 1,5 Stunden, während Bundler/PMVS2 auf der CPU (Central Processing Unit), d.h. auf dem Hauptprozessor des Computers 46 Stunden benötigt, was einen Geschwindigkeitsvorteil durch Berechnungen auf der GPU von Faktor 30 bedeutet. Die Berechnung von Bilddatensätzen mit bis max. 100 Fotos dauert beim Webservice 123D Catch bis zu 20 Minuten, bis das vermaschte 3D-Modell heruntergeladen werden kann. Beim Einsatz im Feld auf archäologischen Grabungen hilft ein sehr leistungsstarker Rechner bei der Aufbereitung von Daten durch Berechnungen über Nacht. Oft ist beim Feldeinsatz nicht davon auszugehen, dass eine starke Internetverbindung zur Verfügung steht, so dass Webservices nur für den späteren Büroeinsatz in Frage kommen.

In weiteren Projekten an der HafenCity Universität Hamburg konnten mit dieser Software sehr gute Ergebnisse bei der automatischen Generierung von 3D-Modellen archäologischer Fundstücke in Äthiopien (Architekturfragmente) und Katar (Dauritzungen und Fundstücke) (Kersten et al. 2014) und bei der Erstellung von 3D-Modellen für eine Museumsausstellung am Beispiel vietnamesischer Kulturobjekte (Kersten & Lindstaedt 2017b) generiert werden. Diese Ergebnisse erreichten wegen der geringen Objektgröße, der qualitativ hochwertigen Kamera Nikon D800 und dem Einsatz von kalibrierten Maßstäben annähernd die Qualität von hochwertigen Streifenprojektionssystemen.

Somit stellt heute das bildbasierte Aufnahme- und Modellierungsverfahren mit entsprechend hochwertigen Kameras und einer geeigneten Software eine echte Alternative hinsichtlich Effizienz, Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu distanzbasierten Messsystemen dar.

Im folgenden Kapitel 2 beginnt der kumulative Teil der Dissertation mit den beiden Fachartikeln „**Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems**“ (Kap. 2.1) und „**Investigations into the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems**“ (Kap. 2.2) über die Untersuchungen der terrestrischen Laserscanner und der handgeführten 3D-Scanner.

2. Genauigkeitsuntersuchungen

2.1. Terrestrische Laserscanner

Kapitel 2.1 veröffentlicht in PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 4/2009 (ISSN 1432-8364) als:

Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems

Autoren: Thomas P. Kersten^a, Klaus Mechelke^a, Maren Lindstaedt^a, Harald Sternberg^a

^a HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

Publikationsverlauf: eingereicht Februar 2009, akzeptiert Mai 2009, publiziert August 2009

Vollständige Referenz: Kersten, T., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H., 2009. Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 4, 301-316.

Internet link: http://www.dgpf.de/pfg/2009/Heft_4.pdf
https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/pfg2009_04_kersten_et_al.pdf
https://www.researchgate.net/publication/233691084_Methods_for_Geometric_Accuracy_Investigations_of_Terrestrial_Laser_Scanning_Systems

Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems

THOMAS P. KERSTEN, KLAUS MECHELKE, MAREN LINDSTAEDT & HARALD STERNBERG, Hamburg

Keywords: Accuracy, evaluation, inclination compensation, laser beam, positioning, standards

Summary: Currently the second, or for some manufacturers even the third, generation of terrestrial laser scanning systems is available on the market. Although the new generation of terrestrial 3D laser scanning systems offer several new (geodetic) features and better performance, it is still essential to test the accuracy behaviour of the new systems for optimised use in each application. As a continuation of previously published investigations the Department Geomatics of the HafenCity University Hamburg (HCU Hamburg) carried out comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems (Trimble GX, Leica ScanStation 1 and 2, and Riegl LMS420i using time-of-flight method and Leica HDS6000, Z+F IMAGER 5006, and Faro LS880 HE using phase difference method). The results of the following tests are presented and discussed in this paper: test field for 3D accuracy evaluation of laser scanning systems, accuracy tests of distance measurements in comparison with reference distances, accuracy tests of inclination compensation, and influence of the laser beam's angle of incidence on 3D accuracy.

Zusammenfassung: Methoden für geometrische Genauigkeitsuntersuchungen terrestrischer Laserscanningsysteme. Die neueste Generation der terrestrischen 3D-Laserscanner bietet einige neue geodätische Eigenschaften und bessere Leistung. Dennoch ist es weiterhin sehr wichtig, das Genauigkeitsverhalten auch neuer Systeme zu testen, um sie optimal in verschiedenen Anwendungen einsetzen zu können. Standardisierte Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner gibt es jedoch bisher heute noch nicht. Das Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg (HCU Hamburg) hat eigene Prüfverfahren entwickelt, die Aussagen über das Genauigkeitsverhalten terrestrischer Laserscannersysteme (TLS) erlauben. In diesem Beitrag werden Untersuchungen mit den Systemen Trimble GX, der Leica ScanStation 1 und 2, dem Riegl LMS-Z420i (alle mit Impulslaufzeitverfahren), sowie Faro LS880, Leica HSD 6000 und dem baugleichen IMAGER 5006 von Zoller + Fröhlich (alle mit Phasendifferenzverfahren) vorgestellt. Streckenvergleiche im 3D-Testfeld und auf einer Vergleichsstrecke, sowie Genauigkeitstests der Neigungssensoren und Untersuchungen zum Einfluss des Auftreffwinkels des Laserstrahles auf die 3D-Punktgenauigkeit wurden durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse bestätigen weitestgehend die technischen Spezifikationen der Systemhersteller.

1 Introduction

Terrestrial laser scanning (TLS) systems have been available on the market for about ten years and within the last five years the technology has become accepted as a standard method of 3D data acquisition, finding its position on the market beside established methods such as tachymetry, photogrammetry and GPS. Terrestrial laser scanning also stands for a paradigm change "from the representa-

tive single point to the exact and highly detailed 3D point cloud" (STAIGER & WUNDERLICH 2006). Advanced technology and new features of 3D laser scanners have been developed in the past two years, introducing additional instrument features such as electronic levels, inclination compensation, forced-centring, on the spot geo-referencing, and sensor fusion (e.g., digital camera and GPS). Most of these elements are obviously equivalent to features that can be seen in total stations. Several au-

thors have already reported on different approaches for investigations into terrestrial laser scanning systems. Nevertheless, standardized test and calibration methods of laser scanning systems do not yet exist for the user.

Due to the huge variety of types of terrestrial laser scanners it is difficult for the user to find comparable information about potential and precision of the laser scanning systems in the jungle of technical specifications and to be able to validate the technical specifications, which are provided by the system manufacturers. Thus, it may be difficult for users to choose the right scanner for a specific application, which emphasises the importance of comparative investigations into accuracy behaviour of terrestrial laser scanning systems.

Therefore several groups, primarily university-based, carried out geometrical investigations into laser scanning systems in order to derive comparable information about the potential of the laser scanners and to find practical testing and calibration methods (BOEHLER et al. 2003, INGENSAND et al. 2003, JOHANSSON 2003, CLARK & ROBSON 2004, SCHULZ & INGENSAND 2004, LICHTI & FRANKE 2005, RIETDORF 2005, NEITZEL 2006, RESHETYUK 2006, BÜTTNER & STAIGER 2007, SCHULZ 2007, WEHMANN et al. 2007, GORDON 2008, GOTTWALD 2008, KERN 2008, GOTTWALD et al. 2009). The department Geomatics of the HafenCity University Hamburg (HCU Hamburg) validates terrestrial laser scanners since 2004, in order to develop their own testing and evaluation methods (KERSTEN et al. 2004, KERSTEN et al. 2005, STERNBERG et al. 2005, MECHELKE et al. 2007, MECHELKE et al. 2008), which allow statements about the accuracy behaviour and about the application potential of terrestrial laser scanner systems to be made.

2 The Terrestrial Laser Scanning Systems Used

The investigations into the accuracy behaviour of terrestrial laser scanners were carried out by using the following laser scanning systems: Trimble GX, Leica ScanStation 1, Leica ScanStation 2, Leica HDS 6000, Faro LS 880, IMAGER 5006 from Zoller & Fröhlich, and RIEGL LMS-Z420i (cf. Fig. 1).

The technical specifications and the important features of these laser scanners are summarised in Tab. 1. The tested scanners are panoramic scanners, but they represent two different distance measurement principles: Faro LS880, Z+F IMAGER 5006, and Leica HDS6000, which is structurally identical with the IMAGER 5006, use phase difference method, while Leica ScanStation 1/2, Trimble GX, and Riegl LMS-Z420i scan with the time-of-flight method. In general it can be stated that phase difference method is fast, but signal to noise ratio depends on distance range and lighting conditions. If one compares scan distance and scanning speed in Tab. 1, it can be clearly seen, that scanners using the time-of-flight method measure longer distances but are relatively slow compared to the phase difference scanners. Trimble GX and both Leica ScanStation instruments scan with a green laser beam (532 nm), while the other three scanners use laser light with wavelengths at near infrared. The precision (internal accuracy) of the scanning instrument is not unitarily specified in the specifications of the manufacturer, i. e., some uses the 3D position and some the distance as a precision criterion.

Most of the presented investigations use spheres as test bodies to obtain the reference positions. The diameters of the used spheres



Fig. 1: Terrestrial laser scanning systems for investigation at HafenCity University Hamburg: Trimble GX, Leica ScanStation 1 and 2, Riegl LMS-Z420i, Faro LS 880HE, IMAGER 5006 from Zoller & Fröhlich, and Leica HDS6000.

are 76.2 mm, 145 mm, and 199 mm, respectively. The materials in the spheres are solid plastic for the small diameter (76.2 mm) and hollow plastic with a special surface coating and centring option for the larger spheres (145 mm & 199 mm). These spheres are of matt white colour and are checked for eccentricity and exact diameter. To obtain centre

positions of the spheres, each point cloud representing the sphere was manually corrected for outliers. The fitting of the sphere geometry was performed for each scanner station using algorithms in the Trimble software RealWorks Survey and 3Dipsos, where the radius of the sphere was fixed with the known value. The algorithm for sphere fitting used by the Trim-

Tab. 1: Summary of technical specifications (according to system manufacturer) of the tested laser scanning systems.

Scanner/Criterion		Trimble GX	Leica ScanStation 1	Leica ScanStation 2	Riegl LMS-Z420i	FARO LS 880 HE	Z+F IMAGER 5006 / HDS 6000
Scan method		Time-of-flight				Phase difference	
Field of view [°]		360×60	360×270	360×270	360×80	360×320	360×310
Scan distance [m]		350	300	300	2–1000	0,6–76	< 79
Wavelength [nm]		532	532	532	~1500	785	658
Scanning speed [pts/sec]		≤ 5000	≤ 4000	≤ 50000	≤ 11000	120000	≤ 500000
Angular resolution [°]	V	0,0018	0,0023	0,0023	0,0020	0,00900	0,0018
	H	0,0018	0,0023	0,0023	0,0025	0,00076	0,0018
Spot size at 10 m		0,6 mm	4,0 mm	4,0 mm	2,5 mm	2,5 mm	3,2 mm
Precision	position	12 mm/100m	6 mm/50 m	6 mm/50 m	–	–	10 mm/50m
	distance	7 mm/100 m	4 mm/50 m	4 mm/50 m	10 mm/50 m	3 mm/25 m	6 mm/50 m
Camera		integrated			add-on option		
Inclination sensor		compensator				yes	yes



Fig. 2: 3D test field at the HafenCity University Hamburg for geometrical investigations into TLS systems.

ble software has not been published. These results of the fitting were compared to results of a MATLAB routine on a random basis. The programmed MATLAB software uses the sphere fitting algorithm as described by DRIXLER (1993). Since there were no differences in the centre coordinates of the spheres, the Trimble software continued to be used for all fitting tasks due to simplified data handling. The standard deviation for sphere fitting was in the range of 0.4–1.0 mm for the test field investigations (cf. Section 3.1), although some deviations increased to 6.0 mm dependent on distance length and sphere diameter.

3 Geometric Investigations

3.1 3D Test Field for Accuracy Evaluation of 3D Laser Scanning Systems

Referring to the guidelines in part 2 and part 3 of the VDI/VDE 2634 (VDI/VDE 2634 2002) the accuracy of 3D optical measuring systems based on area scanning shall be evaluated by checking the equipment at regular intervals. This can be achieved by means of length standards and artefacts, which are measured or scanned in the same way as typical measurement objects. One important quality parameter can be defined as sphere spacing error similar to that in ISO 10 360 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 2007). Instead of calibrated artefacts in object space reference distances

between spheres were used for the accuracy evaluation at HCU Hamburg. However, the precision of 3D laser scanning systems is composed of a combination of errors in distance and angle measurements, and in the algorithm for fitting the spheres/targets in the point cloud. The influence of these errors is difficult to determine independently and this causes issues when the goal is the testing of the whole system (hard- and software). However, in metrology, the accuracy of measurements is affected by the impacts of all random components and systematic errors. For the following evaluations accuracy is defined as a measure to an independent reference.

A durable established 3D test field was used in the hall of building D at the HCU campus (cf. Fig. 2) for test campaigns in March, October and December 2007. This was used in order to evaluate the 3D accuracy of distance measurements derived from the sphere coordinates and of point cloud registration regarding the practical acceptance and verification methods of VDI/VDE 2634. The volume of the test field is $30 \times 20 \times 12 \text{ m}^3$, including 53 reference points, which can be set up with prisms, spheres or targets. Just 38 (in March) and 30 points (in October/December) were used for these investigations. The points are distributed over three hall levels on the floor, on walls or on concrete pillars using M8 thread holes. The reference points were measured from four stations with a Leica TCRP 1201 total station. In a 3D network adjustment using the software Leica GeoOffice the station coordinates were determined with a standard deviation of less than 0.5 mm, while the standard deviation of

Tab. 2: Comparison of 3D distances (all in all combination (left) and seven selected distances (right)) between laser scanner and reference in the 3D test field (tests in March 2007).

Scanner	# 3D points	# dist.	Δl_{\min} [mm]	Δl_{\max} [mm]	span [mm]	syst. shift [mm]	$ \Delta l $ [mm]	# dist.	Δl_{\min} [mm]	Δl_{\max} [mm]	span [mm]
Leica ScanStation 1	38	703	– 9.2	2.3	11.5	–3.6	3.6	7	–5.6	1.6	7.2
Trimble GX	38	703	–27.6	16	43.6	–5.5	6.5	7	–5.9	–1.8	7.7
Z+F IMAGER 5006	38	703	– 6.6	7.4	14.0	0.3	1.8	7	–2.1	3.3	5.4
Faro LS 880 HE	38	703	–30.7	41.1	71.8	0.1	5.0	7	–3.5	29.9	33.4

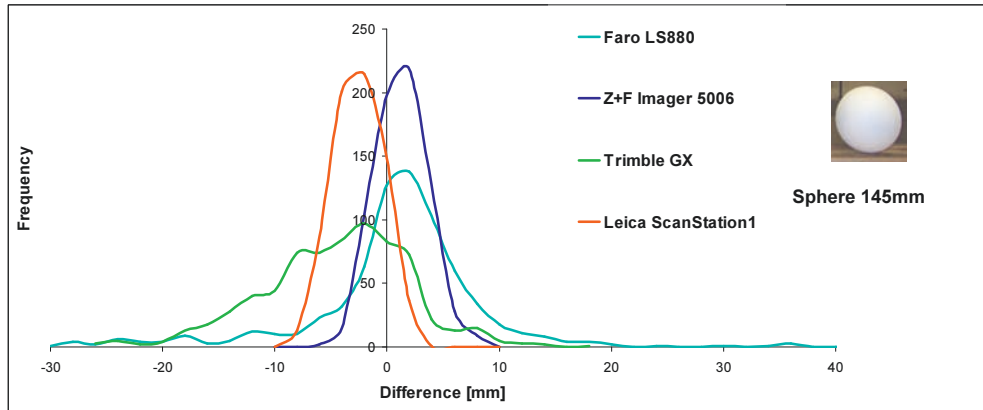


Fig. 3: Distribution of differences (2 mm interval) between scanned distances and reference distances for four tested terrestrial laser scanner (test campaign in March 2007).

the coordinates of the reference points is less than 1 mm (local network). Specially built adapters of the same length as those used with the prisms guaranteed a precise, stable and repeatable set up of spheres. Thereafter, spheres with a diameter of 145 mm (in March 2007) and 199 mm (in October and December 2007) were installed on these reference points. These spheres were scanned with all tested scanners from five scan stations for each system, where two scan stations were located on the ground floor, two on the first floor and the fifth station was placed on the second floor, so that a good geometric configuration for point determination could be guaranteed. For evaluation, all combinations of distances between all reference points were compared to those obtained from the centres of the fitted spheres derived from the registered point cloud. In accordance with the guidelines of VDI/VDE 2634 part III all scan stations were transformed into one common object coordinate system for each laser scanner using the determined coordinates of each sphere centre. The sphere-spacing error Δl is determined by $\Delta l = l_m - l_k$, where m is measured and k is the reference distance. Additionally, the mean value of all absolute values $|\Delta l|$ (sphere spacing error) has been determined according to HEISTER (2006). The minimum distance is 1.5 m and the maximum distance is 33.1 m in the test field, which is within the scanning range of each tested scanner.

Two results of the 3D test field investigations from the March 2007 test campaign are shown in Tab. 2: (a) all differences between scanned and reference distances for all stations (registered in one common object coordinate system using the sphere centre coordinates for transformation), and (b) the differences between scanning and reference of seven selected well-distributed distances (same distances for all scanners) are summarised as the span ($\Delta l_{\max} - \Delta l_{\min}$) from minimum to maximum deviation value as an indication of the accuracy of each system. The differences between the distances in case (a) are highly correlated, while the distances in case (b) were selected as proposed in the VDI/VDE 2634, and to avoid these correlations. Instead of seven distances, HEISTER (2006) proposed eight spatial distances in the object for this test. This range value Δl is influenced by the measurement precision of the instrument and by the algorithm for the fitting of the sphere. Since the fitting with the Trimble software has been checked as previously mentioned, errors in sphere fitting can be excluded. The best result was a range from minimum to maximum of 11.5 mm for all differences, which was achieved with the Leica ScanStation 1, while for the IMAGER 5006 a span of 5.4 mm was obtained using the seven differences of distances (see Tab. 2). The three scanners ScanStation 1, GX und IMAGER 5006 show similar accuracy behaviour (between 5 and 8 mm) using the same seven distances, while the Faro

Tab. 3: Comparison of 3D distances (all in all combination (left) and seven selected distances (right)) between laser scanner and reference in the 3D test field (Oct./Dec. 2007).

Scanner	# 3D points	# dist.	Δl_{\min} [mm]	Δl_{\max} [mm]	span [mm]	syst. shift [mm]	$ \Delta l $ [mm]	# dist.	Δl_{\min} [mm]	Δl_{\max} [mm]	span [mm]
Leica ScanStation 1	27	351	-6.4	5.4	11.8	-0.7	1.8	7	-3.1	1.6	4.8
Leica ScanStation 2	28	378	-8.6	4.8	13.4	-2.2	2.6	7	-4.3	-2.3	6.6
Riegl LMS420i	27	351	-6.5	19.8	26.3	6.3	6.5	7	2.5	12.8	10.3
Leica HDS6000	29	406	-6.3	6.7	13.0	0.2	2.0	7	-2.4	2.4	4.8
Z+F IMAGER 5006	29	406	-7.7	5.7	13.4	-0.4	2.1	7	-4.4	1.6	6.0

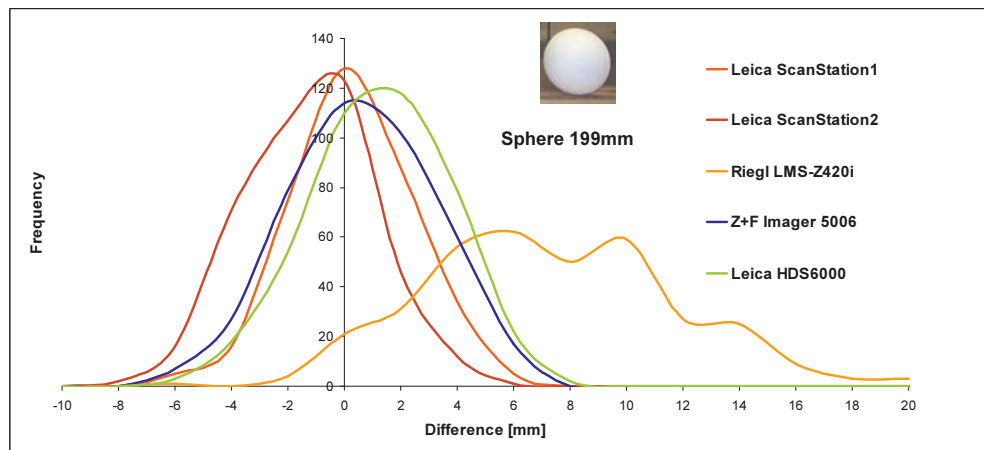


Fig. 4: Distribution of differences (2 mm interval) between scanned distances and reference distances for five tested terrestrial laser scanner (test campaign in October and in December 2007).

scanner is significantly worse. In contrast to these good results the spans of the Trimble GX and Faro scanners show huge values of 43.6 mm and 71.8 mm, respectively (cf. Tab. 2), using all differences, which demonstrates that these scanners obviously have problems with some 3D distances. In an earlier investigation, which is not published, a significantly better result (span min/max = 17.3 mm) was achieved with the Trimble GS100, the predecessor model of the GX. The average value of all differences was less than +1 mm for Faro and Z+F scanner, while this value was -3.6 mm for Leica ScanStation 1 and -5.5 mm for Trimble GX scanner, which indicates a systematic shift and which is clearly illustrated in Fig. 3. Currently, these systematic shifts cannot be ex-

plained. As demonstrated in Tab. 2 the sphere spacing error ($|\Delta l|$) is very good for IMAGER 5006 with 1.8 mm, while this error is worse by a factor 3–4 for Faro LS880 (5.0 mm) and Trimble GX (6.5 mm).

The results of the subsequent 3D test field investigations in October and December 2007 for the five scanners Leica ScanStation 1 and 2, Leica HSD6000 and IMAGER 5006, and Riegl LMS-Z420i are summarised in Tab. 3. In these test field investigations spheres with a diameter of 199 mm were used since significantly more measured points were achieved on each sphere over longer distances when compared to the smaller spheres. These results confirm the previous results from March 2007, where the span ($\Delta l_{\max} - \Delta l_{\min}$), which was ob-

tained with the Riegl scanner, is slightly worse, but better than the span for GX and Faro LS880. Again, two scanners (Leica ScanStation 2 and Riegl) show a systematic shift in the deviation from the reference (cf. Tab. 3), which is also illustrated in Fig. 4. On the other hand the systematic shift, which was computed for the Leica ScanStation 1 in March 2007 (cf. Tab. 2), could not be confirmed with a different Leica ScanStation 1 in the investigation of October 2007 (see Tab. 3). As shown in Tab. 3 the sphere spacing error $|\Delta l|$ is very good for both ScanStations (1.8 mm/2.6 mm), for HDS6000 (2.0 mm) and for IMAGER 5006 (2.1 mm), while this error is worse by a factor 3 for Riegl LMS420 (6.5 mm). However, in general the results of the IMAGER 5006 (and HDS6000) are very similar for both independent test campaigns in March and October 2007, which is also a confirmation of the reliability of the approach used.

Better results of the span ($\Delta l_{\max} - \Delta l_{\min}$) and of the sphere spacing error have been achieved for Leica HDS6000 (3.5 mm/1.8 mm) and Faro LS880 (8.9 mm/2.0 mm) by KERN & HUXHAGEN (2008) using a test field with short distances between 0.9 m and 3.5 m for spheres with a diameter of 76.2 mm. The number of reference distances used for this test is not published. GORDON (2008) used a test field with the dimensions of 12.5 m \times 5 m \times 3.5 m with 37 spheres for the IMAGER 5003. In this test slightly worse results have been obtained for the span: 17.8 mm using 666 distances with 37 spheres and 15.6 mm for 8 sphere distances.

3.2 Accuracy Tests of Distance Measurements in Comparison to Reference Distances

Accuracy tests of distance measurements using reference distances derived from a precise total station were performed in an outdoor environment for distance ranges from 10 m to 100 m in steps of 10 m (targets on a tripod) for Trimble GX, Leica ScanStation 1, Faro LS 880HE and for Z+F IMAGER 5006 in March 2007. Reference distances were measured with a Leica TCRP1201 10 times before and 10 times after the scanning using averaging distance measurement mode. The differences between the first and second measurement sequences were less than 0.3 mm. A standard deviation of 0.1 mm was achieved for the reference distances. Since all tested scanners use Wild-type forced-centring, it was possible to exchange prisms for scanner targets. By using special adaptors the centre of the scanner target could be placed in the same position as the prism centre.

All scanning distances for Faro LS880 and IMAGER 5006 were derived from scanned spheres with a diameter of 145 mm, while for Leica ScanStation HDS targets and for Trimble GX green flat targets were used. For repeatability and reliability reasons each distance to sphere or target was scanned three times in the sequence forward-backward-forward with each scanner from the same position. Due to the limitation of scanning range Faro LS880 scans were checked to the dis-

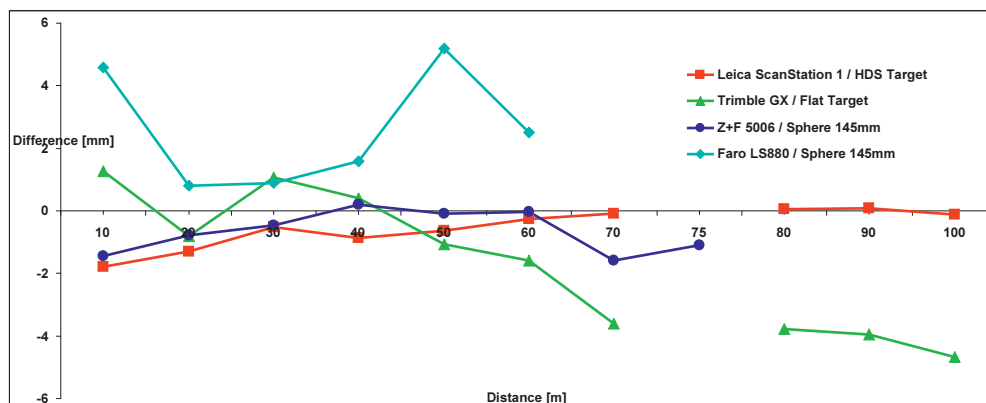


Fig. 5: Comparison of the differences between scanning and reference distances (campaign March 2007).

tance of 60 m and IMAGER 5006 scans to 75 m. All major results of this accuracy test are illustrated in Fig. 5. This figure clearly indicates that the differences between the Leica ScanStation and IMAGER 5006 and the reference distances are always less than 2 mm, while for the Trimble GX the differences are also less than 2 mm between 10–60 m, but from 70 to 100 m distance the differences increased to a systematic effect of 3–5 mm. The differences between the Faro LS880 scans and the reference were in the range of 1–5 mm. Although Faro LS880 and Z+F IMAGER 5006 are capable of measuring up to 80 m, it must be stated that even with the highest resolution the number of ‘hits’ on the 145 mm sphere is not high enough for distances beyond 50 m to allow precise fitting of sphere geometry. Additionally, in several practical outdoor tests it was notable that signal to noise ratio rises depending on daylight conditions for longer distances.

Due to the long range of the Leica ScanStation 2 and the Riegl LMS-Z420i the investigations into the accuracy of distance measurements were carried out with a different setup on the official baseline of the city of Hamburg in Ohlsdorf, which consists of seven granite columns and covers a distance range up to 430 m. For these investigations additional points in 10 m intervals were integrated on a tripod

for the distance range up to 75 m. All reference distances were measured by a precision total station Leica TCA2003. These determined reference distances deviated on average by ± 0.5 mm from distances which were measured with a high precision Kern Mekometer 5000 before these investigations.

The scans of the ScanStation 2 to different targets (HDS flat blue target, HDS black/white target as well as spheres with a diameter of 199 mm) were controlled using the software Leica Cyclone 5.8. The spheres used are plastic hollow balls with a special surface coating and centring option, which were developed at the HCU. All scans were executed with active inclination compensation and distance corrections for atmospheric pressure and temperature, whereby each target was scanned four times. The respective sphere centre coordinates were computed automatically in Cyclone and averaged afterwards in order to compare the scanned horizontal distances with the reference distances (cf. Fig. 6).

As a result, indicated in Fig. 6, a scale factor of approx. +65 ppm can be derived for the ScanStation 2. In the scan range under 100 m measurements to the HDS flat targets show the smallest residuals (< 5 mm), while over 100 m distance the measurements to the spheres indicate the best results (residual of max. 12.5 mm to a distance of 287 m). It can be

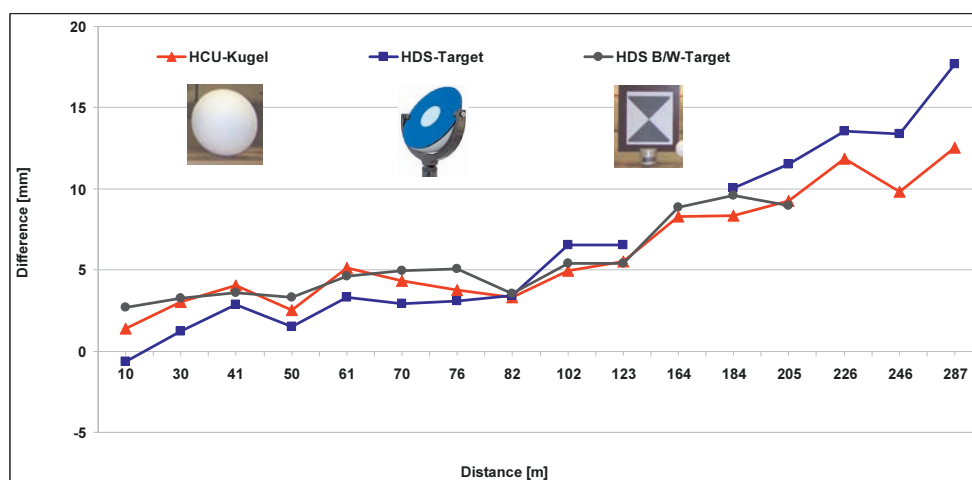


Fig. 6: Comparison of the differences between scanning and reference distances for the Leica ScanStation 2 (test campaign in October 2007).

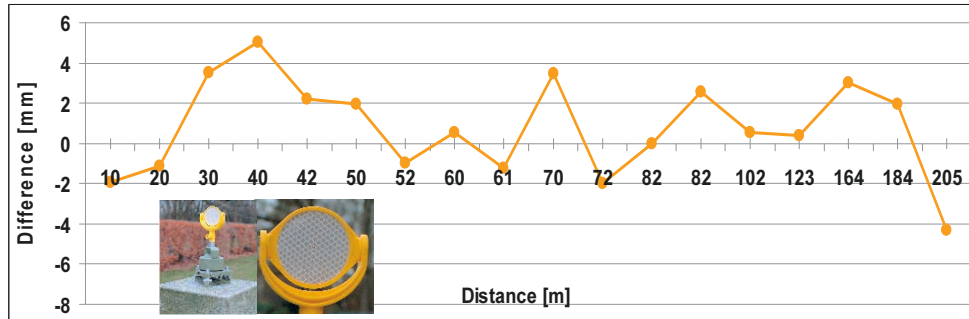


Fig. 7: Comparison of the differences between scanning and reference distances for the Riegl LMS 420i using the reflective target (test campaign in December 2007).

assumed that the fitting algorithm is positive affected by the larger sphere surface compared to the HDS flat blue target. For the measurements to black/white targets the fitting algorithm of Cyclone could only supply a result up to a distance of 205 m. This scale factor is affected by the targets/spheres being too small in relation to the long scan distances (over 200 m). Larger targets/spheres would probably yield better results. Therefore other ScanStations 2 should be tested for the presence of the same problems.

The results of the investigations into the scanning accuracy of the Riegl LMS-Z420i scanner using the reflective target (size 50 mm), which was scanned three times for each position, are illustrated in Fig. 7. The differences between scanning distance and reference are in the range of ± 5 mm for distances up to 205 m, but for distances over 205 m the target used was too small to derive reliable results from these scanned distances. Thus, the target size must be adapted to a larger size (e. g., 100 mm) for scanning longer distances in future tests. TAUBER (2005) could achieve similar results on the baseline of the Leibniz University Hanover using the Riegl LMS 360i.

The accuracy investigations into the tested laser scanning systems clearly demonstrated that the systems meet the technical specifications of the manufactures for distances up to 200 m.

3.3 Accuracy Tests of Inclination Compensation

All scanners in the test programme are equipped with an inclination sensor (see also Tab. 1), making it possible to level the scanner during measurements. Leica ScanStation 1/2 and Trimble GX are able to compensate for changes of main axis inclination during measurement, while Faro LS 880 uses corrections only for post-processing (in the registration of scans). The Z+F IMAGER 5006 uses the inclination sensor for gross error detection to indicate changes during the scanning, and for corrections of the scanned data in the post processing. If the inclination sensor is switched on during the scanning process, it is assumed for the time-of-flight scanners that the XY-plane of the scanner coordinate system is horizontal.

In order to check the accuracy of inclination compensation of each scanner, an outdoor test field was established using 12 spheres in steps of 30° on the circumference of a circle with a radius of 50 m. Each sphere was set up on a pole and was adjusted to the same height by using a Wild N3 high-precision level instrument, while the tested scanners were set up in the centre of the circle on a heavy-duty tripod (cf. Fig. 8). While scanning the spheres, it is assumed that the centre coordinates of the fitted geometries (spheres) lie in-plane and that this plane is horizontal ($Z = \text{constant}$). To check for movements of the scanner tripod during scanning, a Leica Nivel20 inclination sensor was fixed to the tripod, recording inclination in x and y direction in intervals of 5

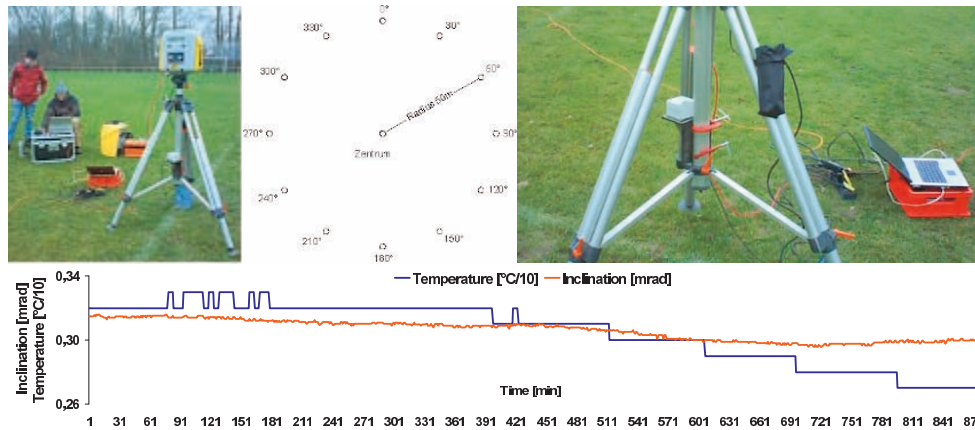


Fig. 8: Test field for inclination compensator of the terrestrial laser scanner: scanner on solid tripod (left), schematic test configuration for scanner and spheres (centre), inclination sensor Leica Nivel20 fixed at the scanner tripod (right) and illustration of tripod movement derived from Nivel20 measurements over the test period of more than 871 minutes (bottom).

seconds. The recordings of the Nivel20 showed no significant movements of the tripod during scanning (cf. Fig. 8).

Each sphere was scanned consecutively three times (March 2007) and five times (October and December 2007) with the highest possible resolution settings. The fitting of sphere geometries was performed using Trimble RealWorks Survey 5.1. Before sphere fitting, outliers were removed manually from the point cloud. The derived average Z-coordinates of all fitted spheres were compared to the reference horizontal plane for each scanner. Differences in Z vs. the reference plane were obtained from the average Z-coordinate of each position in the circle and are shown in Fig. 9. This is a clear indication that the compensation of inclination works almost perfectly for all tested time-of-flight scanners, while for the phase difference scanner it can be seen that scanning has been conducted in an inclined plane.

Leica and Trimble scanners show maximum deviations of 2 mm with a very minor sine oscillation, probably resulting from calibration error of the inclination sensor (cf. Fig. 9 top). Faro LS880 shows huge differences up to 15 mm, which may be influenced by the comparably low resolution (8 mm / 50 m) and the large signal to noise ratio of this scanner. The behaviour of the IMAGER 5006, tested in March with spheres with a diameter of 145 mm

and in October 2007 with spheres with a diameter of 199 mm, is almost identical and is very similar to the Faro LS880. These effects are influenced by a slight inclination of the rotation axis. In Fig. 9 (bottom) differences from an average plane fitted through the centre coordinates of the spheres are shown. Since all spheres were positioned on a plane, differences should be zero. The resulting differences may be interpreted as effects of a tumbling error of the trunnion axis, but especially for the Faro and Z+F scanners the results are influenced by the sphere fitting error due to the scanning noise on the longer distances. Further investigations have to be performed with bigger targets and/or smaller radius of circle to guarantee sufficient numbers of scanned points on the spheres for reliable and precise sphere fitting, especially for phase difference scanners with limited scan distances.

Fig. 10 (left) shows a sine oscillation resulting from an inclined vertical axis when the inclination compensation of the Leica ScanStation 2 is switched off. The magnitudes of the amplitude following the 360° rotation depend on the inclination angle. When inclination compensation is switched on, the graph shows very minor deviations of better than 1mm for the z coordinate vs. the horizontal plane (cf. Fig. 10 right). Since these results are very similar to the previous tests using Leica ScanStation 1 and Trimble GX (cf. Fig. 9 top),

it can be stated that the dual axis (tilt) compensator of the scanners with the time-of-flight method almost perfectly adjusts for changes of inclination during scanning.

3.4 Influence of the Laser Beam's Angle of Incidence on 3D Accuracy

Among other effects the accuracy of a point cloud is dependent on the angle of incidence of

the laser beam. Reasons for this effect are the spot size and shape of the laser beam and the reflectivity of the object. The shape and its centre position influences the reflectance of the laser beam, which affects the precision of the scanned distance, and the 3D position of a scanned point within the point cloud. To evaluate the influence of the laser beam's angle of incidence on 3D accuracy of the point cloud a planar white stone slab with a dimension of $75 \times 79 \text{ cm}^2$ (cf. Fig. 11 centre) was mounted in a metal frame and could be swivelled in this

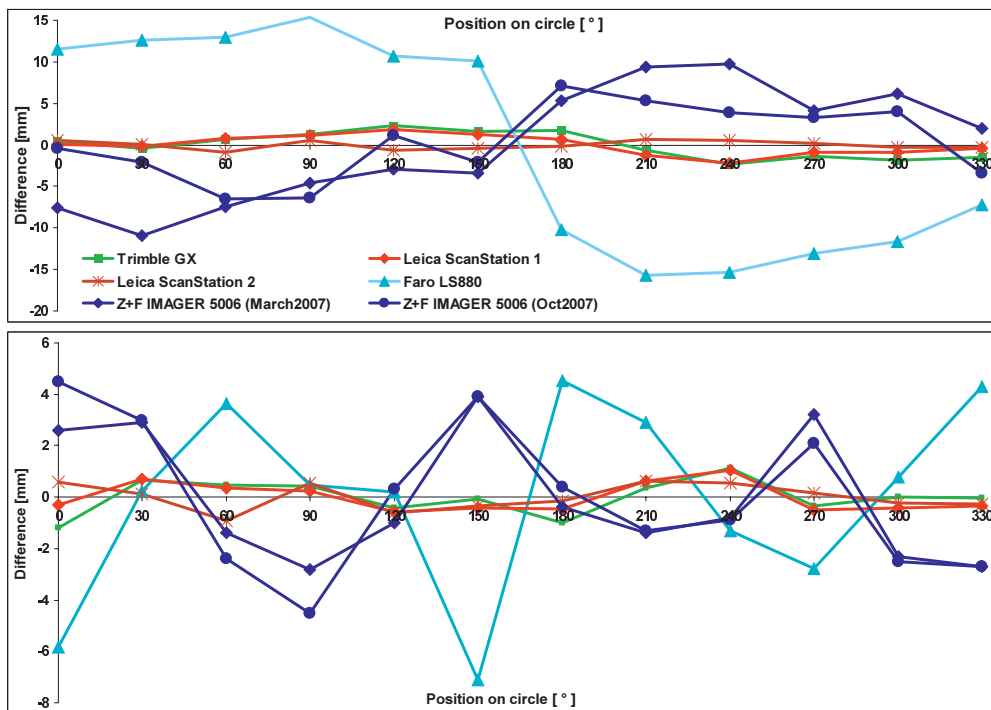


Fig. 9: Test of inclination sensor in comparison: Differences between scanned spheres and horizontal XY plane (top), and average XY plane (bottom).

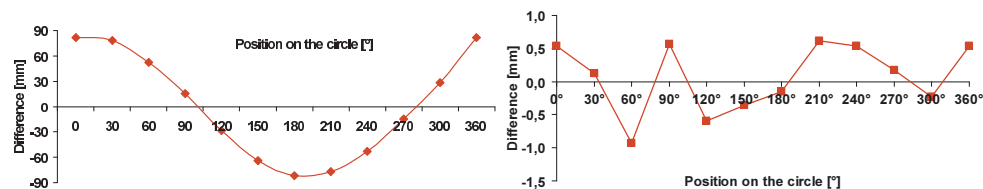


Fig. 10: Leica ScanStation 2: Differences vs. horizontal plane (z-coordinate) for switched off compensator (left) and active inclination compensator (right). Note the difference in y-scale between the two graphs.



Fig. 11: Scanning set up for the investigations into the laser beams angle of incidence on 3D accuracy with swivelling planar white stone slab (centre).

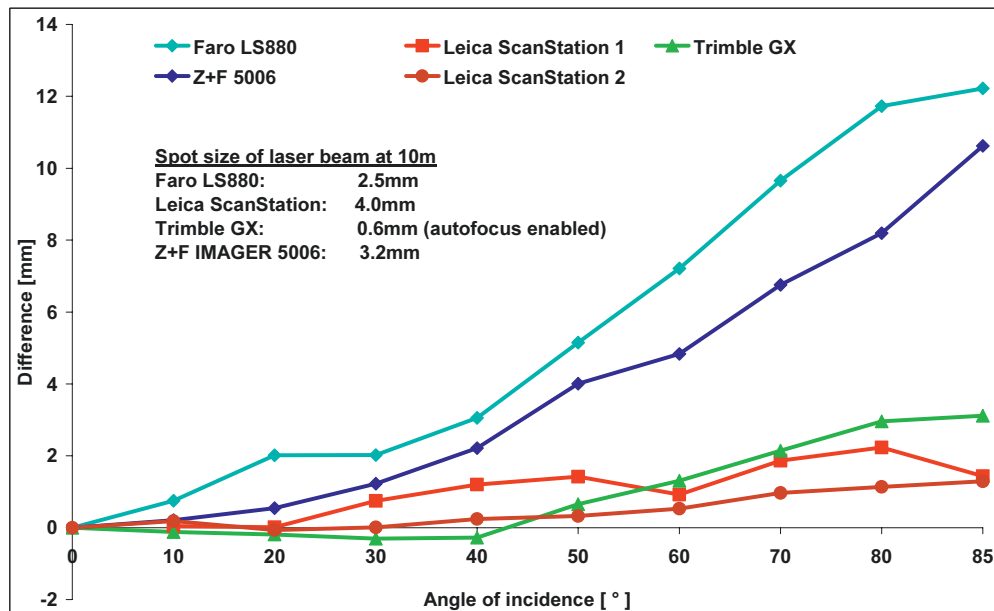


Fig. 12: Influence of angle of incidence on 3D accuracy in comparison.

frame. The frame was equipped with a reading device to set the stone slab at defined angular positions with a precision of 5° . Additionally, four spheres (radius 38.1 mm) were fixed on the stone slab, thus swivelling together with the stone slab. The stone slab and the spheres were scanned with a resolution of 3 mm at an object distance of 10 m. In total, ten scans were acquired in angular positions of the stone slab from 90° to 5° . Each plane, which was fitted in the resulting point cloud of

the stone slab, was compared to reference points.

Since the angular position of the stone slab has no effect on the point cloud of the spheres, the centres of the spheres were selected as reference points for each position. Thus, the distance between the centre of the sphere and an average plane fitted through the point cloud representing the stone slab should be constant in an ideal case for each angular position of the stone slab. Nevertheless, it can be observed

in Fig. 12 that the distance between the centres of the spheres and the computed plane increases with an increasing angle of incidence. The time-of-flight scanners show minor effects of up to 3 mm for an angle of incidence of 80°–85°, while the phase difference scanners achieve difference values of up to 12 mm for the same angle. But generally, it can be stated that if the angle of incidence is more than 45°, significant influence on the accuracy of the point cloud can be expected. The conditions in the test environment were the same for all scanning systems. But to achieve results for comparison with other test environments, the spectral reflectance of the stone slab should be determined in relation to the wavelength of the laser beam. Additionally, further investigations are still necessary to check the influence of angle of incidence for longer object distances.

4 Conclusions and Outlook

The major results of different tests using the current instruments of the new generation of terrestrial laser scanners are summarised in this paper. The investigations in the 3D test field showed that the range value (span), which is influenced by the measurement precision of the instrument and by the algorithm for the fitting of the sphere, varied from 11.5 mm to 71.8 mm for the tested scanners. It must be stated that these results are derived from highly correlated differences between scanned and reference distances. According to the proposal of HEISTER (2006) and the VDI/VDE 2634 (2002) a span from 4.8–10.3 mm (exceptional case 33.4 mm for Faro) has been achieved in the test field using just seven selected well-distributed distances for comparison. However, the influence of errors in distance and angle measurements have not been determined separately due to the purpose of testing the complete laser scanning system (hard- and software). In this test it could be demonstrated that only the time-of-flight scanners achieved a systematic shift of up to +6 mm in the derived distances. The sphere spacing error was better than 3 mm for most of the scanners, exceptions were Trimble GX, Riegl LMS420 and Faro LS880.

The accuracy tests of distance measurements in comparison to reference distances showed clearly that the results of most of the scanners met the accuracy specification of the manufacturer, although the accuracy (defined as measured versus reference distance) is slightly different for each instrument. As shown in Tab. 5 only the Faro scanner has slight problems meeting the accuracy specification. Furthermore, the accuracy is decreasing significantly for increasing distances longer than 200 m. It can be assumed that the targets/spheres used for these longer distances were too small. Consequently, the target/sphere size must be adapted to the scanning distance. However, it could be seen in several practical outdoor tests that signal to noise ratio rises in daylight conditions for longer distances.

The accuracy tests of the inclination compensation show that the inclination of the time-of-flight scanners is successfully compensated, while the phase difference scanners show effects (not errors) resulting from inclination of the vertical axis. A trunnion axis error could not be proven. The influence of angle of incidence on 3D accuracy can be neglected for time-of-flight scanners, while phase difference scanners show significant deviations, if the angle of incidence is more than 45°. The accuracy is also not influenced by the spot size of the laser with respect to the angle of incidence. Nevertheless, previous investigations into the influence of object colour on the quality of laser distance measurements showed that for the Faro and Trimble scanners some object colours cause significant effects on the accuracy of the scanning distance (MECHELKE et al. 2007).

All investigations showed clearly that the tested scanners are still influenced by instrumental errors, which might be reduced by instrument calibration. Therefore, it is necessary to define standards for investigations and tests of laser scanning systems to derive simple calibration methods for the scanners as is usual for total stations and which can be applied by the user. These presented test procedures may be taken into consideration for future discussions on the implementation of standardized test procedures. A valuable proposal for the definition of standardised quality param-

ters for the investigation of terrestrial laser scanning systems is already summarised by HEISTER (2006) and practically tested by KERN & HUXHAGEN (2008). Future investigations in TLS should refer to these definitions.

References

- BOEHLER, W., BORDAS VICENT, M. & MARBS, A., 2003: Investigating Laser Scanner Accuracy. – XIXth CIPA Symposium, Antalya, Turkey, cipa.icomos.org/fileadmin/papers/antalya/189.pdf.
- BÜTTNER, E. & STAIGER, R., 2007: Erste Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5006 von Zoller+Fröhlich. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 260–269.
- CLARK, J. & ROBSON, S., 2004: Accuracy of measurements made with CYRAX 2500 laser scanner against surfaces of known colour. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35** (B4): 1031–1037.
- DRIXLER, E., 1993: Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum. – DGK Reihe C **409**, München.
- GORDON, B., 2008: Diskussion von Feldprüfverfahren zur Messunsicherheitsbestimmung. für terrestrische Laserscanner. – Terrestrisches Laserscanning (TLS2008), DVW-Schriftenreihe **54**: 125–142.
- GOTTWALD, R., 2008: Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners – A Contribution to a Future ISO Standard. – FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden.
- GOTTWALD, R., HEISTER, H. & STAIGER, R., 2009: Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung. – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement **2**: 88–96.
- HEISTER, H., 2006: Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). – Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). DVW-Schriftenreihe des DVW, Wißner-Verlag, Augsburg, **51**: 15–34.
- INGENSAND, H., RYF, A. & SCHULZ, T., 2003: Performances and Experiences in Terrestrial Laser-scanning. – Optical 3-D Measurement Techniques **VI**: 236–243.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007: ISO 10360 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 1–6.
- JOHANSSON, M., 2003: Explorations into the behaviour of three different high-resolution ground-based laser scanners in the built environment. – CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece: 33–38.
- KERN, F., 2008: Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 306–316.
- KERN, F. & HUXHAGEN, U., 2008: Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). – Terrestrisches Laserscanning (TLS2008), DVW-Schriftenreihe **54**: 111–124.
- KERSTEN, TH., STERNBERG, H., MECHELKE, K. & ACEVEDO PARDO, C., 2004: Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 98–107.
- KERSTEN, TH., STERNBERG, H. & MECHELKE, K., 2005: Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Trimble GS100. – Optical 3-D Measurement Techniques **VII I**: 122–131.
- LICHTI, D. D. & FRANKE, J., 2005: Self-calibration of the iQsun 880 laser scanner. – Optical 3-D Measurement Techniques **VII I**: 112–121.
- MECHELKE, K., KERSTEN, TH., & LINDSTAEDT, M., 2007: Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. – Optical 3-D Measurement Techniques **VIII I**: 319–327.
- MECHELKE, K., KERSTEN, TH., & LINDSTAEDT, M., 2008: Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscanningssysteme – Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 317–328.
- NEITZEL, F., 2006: Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip. – Terrestrisches Laser-Scanning (TLS2006), DVW-Schriftenreihe **51**: 15–34.
- RESHETYUK, Y., 2006: Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. – Licentiate thesis in Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- RIETDORF, A., 2005: Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. – DGK Reihe C, Nr. **582**, München.
- SCHULZ, T., 2007: Calibration of Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. – Dissertation No. 17036, ETH Zürich.

- SCHULZ, T. & INGENSAND, H., 2004: Influencing Variables, Precision and Accuracy of Terrestrial Laser Scanners. – 'Ingeo 2004', Bratislava, www.geometh-data.ethz.ch/downloads/SchulzT_TS2_Bratislava_2004.pdf.
- STAIGER, R. & WUNDERLICH, T., 2006: Terrestrisches Laserscanning 2006 – technische Möglichkeiten und Anwendungen. – Terrestrisches Laser-Scanning (TLS2006), DVW-Schriftenreihe **51**: 3–14.
- STERNBERG, H., KERSTEN, TH. & CONSEIL, N., 2005: Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Trimble GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 56–65.
- TAUBER, S., 2005: Untersuchung zur Mess- und Registriergenauigkeit des Laserscanners Riegl LMS-Z360i. – Diplomarbeit im Institut für Kartographie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, www.ikg.uni-hannover.de/publikationen/diplomarbeiten/2005/tauber/da_tauber_2005.pdf.
- VDI/VDE 2634, 2002: Optische 3D-Messsysteme – Systeme mit flächenhafter Antastung. – VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), VDI/VDE Richtlinien, Düsseldorf.
- WEHMANN, W., ZYL, CH. VAN, KRAMER, H., WIDIGER, D. & ZIMMERMANN, R., 2007: Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld. – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement **3**: 175–180.

Address of the Authors:

THOMAS KERSTEN, KLAUS MECHELKE, MAREN LINDSTAEDT, HARALD STERNBERG, HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5343, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: {Thomas.Kersten, Klaus.Mechelke, Maren.Lindstaedt, Harald.Sternberg}@hcu-hamburg.de

Manuskript eingereicht: Februar 2009

Angenommen: Mai 2009

2.1. Handgeführte 3D-Scanner

Kapitel 2.2 veröffentlicht in PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 5-6, 2016 (ISSN 1432-8364) als:

Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems

Autoren: Thomas P. Kersten^a, Heinz-Jürgen Przybilla^b, Maren Lindstaedt^a

^a HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

^b Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie

Publikationsverlauf: eingereicht Oktober 2016, akzeptiert Oktober 2016, publiziert Januar 2017

Vollständige Referenz: Kersten, T., Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., 2016. Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 5-6, 271-283.

Internet link: https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/pfg2016_kersten_et_al.pdf



Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems

THOMAS P. KERSTEN, Hamburg, HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Bochum & MAREN LINDSTAEDT, Hamburg

Keywords: 3D comparison, point cloud, structured light, VDI/VDE 2634

Summary: An increasing number of handheld scanning systems by different manufacturers is becoming available on the market. However, their geometrical performance is little-known to many users. Therefore, the Laboratory for Photogrammetry & Laser Scanning of the HafenCity University Hamburg has carried out geometrical accuracy tests with the following systems in co-operation with the Bochum University of Applied Sciences (Laboratory for Photogrammetry): DOTProduct DPI-7/DPI-8, Artec Spider, Mantis Vision F5 SR, and Creaform HandySCAN 700. In the framework of these comparative investigations geometrically stable reference bodies were used. The appropriate reference data was acquired by measurements with two structured light projection systems (AICON smartSCAN and GOM ATOS I 2M). The comprehensive test results of the different test scenarios are presented and critically discussed in this contribution.

Zusammenfassung: Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit von handgeführten 3D-Scanningsystemen. Handgeführte Scannersysteme verschiedener Hersteller sind in zunehmendem Maße am Markt verfügbar, jedoch ist über ihre geometrische Leistungsfähigkeit bei vielen Anwendern wenig bekannt. Daher hat das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit der Hochschule Bochum (Labor für Photogrammetrie) geometrische Genauigkeitsuntersuchungen mit folgenden Systemen durchgeführt: DOTProduct DPI-7/DPI-8, Artec Spider, Mantis Vision F5 SR und Creaform HandySCAN 700. Im Rahmen dieser vergleichenden Untersuchungen wurden geometrisch stabile Referenzkörper eingesetzt. Die zugehörigen Referenzdaten wurden durch Messung mit zwei Streifenprojektionssystemen (AICON smartSCAN und GOM ATOS I 2M) erfasst. Die umfassenden Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Testszenarien werden in diesem Beitrag vorgestellt und kritisch diskutiert.

1 Introduction

In recent years the market of optical 3D sensors has been significantly expanded in the lower (500 Euro to 4,900 Euro), middle (5,000 Euro to 20,000 Euro) and high-end (more than 20,000 Euro) price segment through the development of handheld 3D scanners. The typical application fields of these 3D scanners are mostly limited to close range, i.e. for measuring tasks with distances under one metre up to

a few metres. Due to the current technological variety within the area of 3D scanning, it is a challenge to select a suitable scanning system for a specific application. Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems were already published by KERSTEN et al. (2009), while an accuracy analysis of a handheld mobile laser scanning system for cultural heritage documentation was recently published by CHAN et al. (2016).

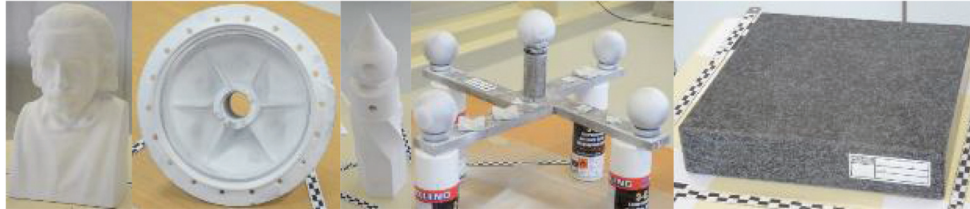


Fig. 1: Reference bodies for the investigations of the handheld scanning systems – from left. Einstein bust, wheel hub, Testy, cross-shaped body HSBO (Bochum) with spheres and granite slab.

Handheld 3D scanners are an optimal supplement to terrestrial laser scanning. However, due to their favourable price and their simple handling these handheld scanners also potentially represent significant competition to the expensive and precise structured light projection systems (also known as fringe projection). Therefore, the question arises, how accurate these 3D scanners are compared to classical structured light systems, e.g. from the manufacturers GOM (2016), STEINBICHLER (Zeiss 2016) or AICON (AICON3D 2016), and what metric quality the user can expect for the acquired 3D data as a price-to-performance ratio. In this area, some results are already available in the literature, e.g. for systems from the gaming industry as well as so-called low-cost systems (structured light system David SLS-1 and Kinect v1/ReconstructMe) for the 3D reconstruction of small objects (HIERONYMUS et al. 2011, WUJANZ et al. 2011, KHOSHELHAM 2011, BOEHM 2014, KERSTEN et al. 2016a). As expected, these investigations demonstrate that the stability and the metric quality of these systems cannot at present compete with high-end systems.

In the following contribution, geometrical accuracy tests using different handheld 3D scanners (middle price class) will be presented as a continuation of the first tests including low-cost systems such as Structure Sensor, Kinect v1 and v2, and Google's Project Tango (KERSTEN et al. 2016b). For these investigations reference datasets that were derived from measurements with high-end structured light systems (AICON smartSCAN and GOM ATOS I 2M) for different stable bodies were used.

2 Reference Bodies

For the benchmarking test the following reference objects were used (Fig. 1): a gypsum bust of Einstein (height of 160 mm), a wheel hub from cast irons with the dimensions $232 \times 120 \times 232 \text{ mm}^3$ and four so-called "Testys" (height of 380 mm) from the Institute for Computer Science of the Humboldt University in Berlin (REULKE & MISGAISKI 2012). Further examinations took place using the following geometrically-stable reference bodies from the Bochum University of Applied Sciences (HSBO): a cross-shaped body with steel spheres (max. distance 450 mm of five spheres with a diameter of 65 mm) and a planar granite slab (size $300 \times 300 \text{ mm}^2$).

3 Tested Handheld 3D Scanning Systems

The following handheld 3D scanning systems (Fig. 2), with selected technical data summarized in Tab. 1, were available for the tests: two DotProduct DPI-7 (State Office of Criminal Investigations Hamburg (LKA), and Dr. Hesse and Partner Engineers, dhp:i), DotProduct DPI-8 (AllTerra Deutschland GmbH, Schenefeld), Artec Spider (LKA, Hamburg), Mantis Vision F5 Short Range (MexConsult, Bredstedt), Creaform HandySCAN 700 (Hanack und Partner, Hamburg).



Fig. 2: Examined handheld scanner systems (from left): DPI-7, DPI-8, Artec Spider, Mantis Vision F5 SR, and Creaform HandySCAN 700.

3.1 DotProduct DPI-7/DPI-8

A substantial component of the hardware of the DPI-7 (DotProduct 2016) and DPI-8 scanner (DotProduct, USA) is a PrimeSense sensor (Carmin 1.08/Carmin 1.09), as it is also mounted in the Kinect v1 (NIR projector as well as NIR and RGB cameras). After a cold boot the system needs approximately 20 minutes preheating time. The control of the sensor is carried out by a connected Android tablet using the software Phi.3D. For the registration of the point clouds the sensor data of the internal accelerometers and gyroscopes of the tablet are used. If sufficient overlap is available for the scans (control via visual colour information at the tablet), an ICP algorithm (BESL & MCKAY 1992) performs a pre-registration of scans. After scanning, the registration will be optimized by also eliminating incorrect points, e.g. mixed pixels. The measuring range of the DPI-7 scanner is between 0.6 m and 3.3 m (0.6 m and 5.0 m for DPI-8 according Trimble's specifica-

tion), whereby a short range version with up to 1.2 m range (system of dhp:i) and a long range version with up to 3.3 m (systems of the LKA) are available. The instrument has the dimensions of $20 \times 24 \times 6 \text{ cm}^3$. Investigations of the DPI-7 are presented by JAHRAUS et al. (2015), applications by AHERN & SPRING (2015).

3.2 Artec Spider

Artec Spider (ARTEC3D 2016, Luxembourg) is a handheld 3D scanner, which was developed particularly for CAD users, to scan small items with complex surface structure, sharp edges and thin ribs with 7.5 photos or with 1 million points per second. The system needs a preheating time of approximately 30 minutes and works with a linear field of view between $90 \times 70 \text{ mm}^2$ and $180 \times 140 \text{ mm}^2$. The measuring range is between 0.17 m – 0.35 m. The Artec Spider uses structured light technolo-

Tab. 1: Selected technical data of the examined 3D scanners (manufacturer's data).

System	Measuring procedure (SL = Structured Light)	Range (m)	Precision (mm)	Weight (kg)	Cost (Euro)
DPI-7 (dhp:i)	SL – speckle pattern	0.60 – 1.20	2 (@ 1m)	< 1.00	5,000
DPI-7 (LKA)	SL – speckle pattern	0.60 – 3.30	2 (@ 1m)	< 1.00	5,000
DPI-8	SL – speckle pattern	0.60 – 5.00	2 (@ 1m)	< 1.00	4,700
Artec Spider	SL – speckle pattern	0.17 – 0.35	0.05	< 1.00	15,700
Mantis F5 SR	SL – speckle pattern	0.30 – 0.80	0.05 (@ 50cm)	0.60	15,000
HandySCAN 700	Stereo-Photogrammetry	0.10 – 4.00	up to 0.03	0.85	49,000
ATOS I 2M	SL – Gray code	0.16 – 1.28	0.02	3.50	50,000
smartSCAN	SL – Gray code	0.03 – 1.50	0.009 (plane)	4.00	80,000

gy (speckle pattern) with blue LED as a light source and a colour camera with 1.3 megapixels (24-bit radiometry) for the texture mapping of the objects. For the generation of 3D models the software Artec studio can be used in combination with the measuring system. Sample applications of this system have been published by ADAMS et al. (2015), FRIEDMAN et al. (2015) as well as INZERILLO et al. (2015).

3.3 Mantis Vision F5 Short Range

The Mantis Vision F5 (Israel) is a structured-light handheld scanner with a measuring range of 0.5 m – 4.5 m (MVC F5) respectively 0.3 m – 0.8 m (MV F5 Short Range) (OR3D 2016). The sensor hardware consists of two modules: a video camera and a projector, which is integrated in a grab handle. The projector emits infrared light on the object (proprietary pattern), which is captured as coded light by a video camera. The triangulation algorithm calculates a point cloud with 500,000 points/sec. The point density in XY is 1.6 mm @ 0.5 m distance for each image. The depth of field of the sensor-system is about 0.3 m – 0.8 m. Because of the low sensitivity to the ambient light, the system is usable both in darkness and in daylight. WRONA (2014) and ZHANG et al. (2015) describe diverse applications of the scanner.

3.4 Creaform HandySCAN 700

The HandySCAN 700 (CREAFORM 2016) has been introduced as the newest generation of handheld 3D scanning systems from Creaform in May 2014 as “portable 3D measuring solutions and 3D engineering services” (AMETEK 2016). Creaform was founded in Lévis, Québec, Canada in May 2002 and is now a part of AMETEK Ultra Precision Technologies. The portable 3D scanner is equipped with power supply, USB 3.0 cable, calibration board, USB stick, positioning targets and a notebook computer with the software *VXelements*. The resolution of the sensor is 0.050 mm, while the scanning area is 275 mm × 250 mm with a depth of field of 250 mm. Two principal cameras, integrated at the front of the sensor on top

of each other, acquire 60 images per second. Using seven laser crosses (plus one extra line for difficult accessible areas) as a light source, the system is able to provide 480,000 measurements per second to generate the point cloud for 3D meshing. The sensor position is determined in real-time by spatial resection using retro-reflective targets in object space. OUMET et al. (2015) present the use of the former system HandySCAN 3D for the documentation of masonry sculptural elements of the Canadian Parliament Buildings. STAROSTA (2016) investigated the operational capability of the 3D scanner HandySCAN 700.

3.5 Reference systems – ATOS I 2M and AICON smartSCAN 3D

The GOM (Company for Optical Measuring Technology) ATOS (Advanced Topometric Sensor) I 2M, Braunschweig, Germany, is a structured light projection system (Gray code/phase shift) consisting of two CCD cameras having 1624 × 1236 pixels each and a structured light projector. Depending on the lenses used the field of view varies between 500 × 400 mm² and 250 × 200 mm². The ATOS I 2M had been employed as a measuring and reference system in different applications (KERSTEN et al. 2012, RAU & YEH 2012, KERSTEN & LINDSTAEDT 2012, KERSTEN et al. 2016a).

The smartSCAN 3D from AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig, Germany, is a structured light projection system (white light scanner), which operates with the combined gray-code/phase-shift technology. The cameras (in this case delivering 5 Megapixel) record the structured-light pattern (light source: white LED, alternatively green, blue or red) under a predefined triangulation angle, with a measuring sequence of one second. The scanner works in a measuring range from 30 mm to 1500 mm. Examples of use are presented by SLIZEWSKI et al. (2010) and BATHOW & BREUCKMANN (2011).

4 Data Acquisition

The measurements took place on the 5th and 6th of January and 6th of July 2016 in the Geomat-

ics lab at the HafenCity University Hamburg. At various stations data of the reference bodies had been derived from handheld 3D scanners, cameras and the two reference systems. For the wheel hub and the cross-shaped HSBO test body a coating spray was used to convert the shiny surface into a matt and bright surface.

For data acquisition all handheld scanners have to be moved manually, in a slow and uniform movement, around the whole object in a distance between 20 cm and 50 cm. The collected data is transferred to the connected tablet (DPI-7/DPI-8, Mantis F5) or computer (Artec Spider, HandySCAN 700) in real time and displayed in the software. Normally the instruments are used in one go, after having passed through the usual warm-up phase. No turning off occurred during the measurements of a specified reference body, although some of the sensors, e.g. DotProduct DPI, take a short break (less than 1 minute for an additional warm-up of the camera) when beginning a new imaging session. Fast or abrupt movements should be avoided because they will lead to a loss of the continuous automatic registration. Should such an interruption occur, it can be handled in the software in different ways. For instance, the DPI-7 and the DPI-8 have to be moved again over a part of the object that has already been captured for re-orientation. The Mantis Vision F5 control unit only shows the current video image and not the captured data, so a possible loss of signal can only be repaired by registration of segments in post processing. The experience of the operator influences the speed and quality of data collection significantly. The manual movements of the sensor have to be coordinated with the live-view on the display. The acquisition time is a few minutes for all scanners, depending on the object complexity; two of the systems need a preheating time first (Artec Spider and DPI-7/DPI-8).

For the measurements with the structured light projection systems ATOS I 2M and smartSCAN the objects were placed on turntables. The systems were calibrated before the recording started. The data collection is done in a number of single scans, which are registered to each other by using small targets stuck onto the object (ATOS) or matching aids (small, ex-

PLICIT geometrically structured objects), which are placed in object space (smartSCAN). For the ATOS system the number of scans per object lay between 24 and 120 with the registration accuracy differing between 0.023 mm and 0.041 mm. Generally, the number of scans differs, depending on the size, shape and overall complexity of the object. To measure the HSBO cross-shaped body, 70 scans had to be acquired using the smartSCAN, while the acquisition of the granite slab could be completed with only 10 scans.

5 Evaluation and Results

To evaluate the data from the diverse measurement systems multiple formats had to be processed. Some systems delivered point clouds (DPI-7/DPI-8), some others already generated 3D models on the fly by triangulating meshes using the system software (Mantis F5, Artec Spider, HandySCAN 700, ATOS, smartSCAN).

Three reference bodies (Testy, wheel hub and a bust of Einstein) were measured in detail and at high precision with the fringe projection systems and afterwards the meshing was carried out using Geomagic Studio 2012 (GEOMAGIC 2016). The ATOS system generated the reference datasets for Testy 1, 2 and 3, while Testy 4, the wheel hub and the bust of Einstein were measured with the smartSCAN.

The guideline VDI/VDE 2634, part 2 and 3, is an accredited standard for acceptance tests (verifying the specified accuracy) and re-verification (to ensure long-term compliance) of optical measurement systems based on area scanning (VDI/VDE 2002, 2006). Using the framework of well-defined test scenarios, suitable test objects (artefacts) are employed to determine quality parameters. Following the guidelines, tests were executed using the cross-shaped body HSBO with spheres and the granite slab. The derivable quality parameters are:

- Probing error PS (size): This quality parameter arises from the difference between the measured diameter and the diameter of the calibrated sphere.
- Probing error PF (shape): This quality parameter is the range of the radial dis-

tance between the measured points and a best-fit sphere. The best-fit sphere is determined according to the least-squares method with free radius.

- The sphere-spacing error SD is determined from the difference between the measured and calibrated values of the distance between the centres of two spheres. The measured distance is derived from the measured values obtained from multiple area-based probings. The limit, SD, for the permissible three-dimensional sphere-spacing error is the quality parameter sphere-spacing error. It is determined as a length-independent quantity and shall be observed within the entire measuring volume specified.
- The quality parameter flatness measurement error, RE, is the range of the signed distances of the measurement point from the best-fit plane calculated according to the least-squares method.

To evaluate the datasets and calculate the quality parameters Geomagic Studio was used.

5.1 Cross-shaped Reference Body HSBO with Spheres

Fig. 3 shows the probing errors (PS and PF) determined for the HSBO reference body. The characteristic curves of the reference system smartSCAN refer to a comparative measure-

ment with a laser tracker API T3 (interferometric measurement accuracy: $> \pm 15 \mu\text{m}$ or 1.5 ppm), while the other graphs are referenced to the smartSCAN system. Related to the probing error PS (Fig. 3 left) it is remarkable that some sensors (DPI-7, DPI-8, Mantis F5) point out systematic deviations: measurements are too large or too small. Therefore, it can be assumed that the systems have scale problems from the sensor calibration. Compared to the reference system the probing error PS of these systems is larger by a factor of about 5 – 35. The best results in this test have been achieved by the HandySCAN 700, reaching almost the accuracy of the reference system.

The probing error PF (Fig. 3 right) shows the noise behaviour of the sensors. The results of the two DPI-7 handheld scanners are homogeneous and oscillate around 10 mm, while the DPI-8 as the follow-up system shows a significant improvement possibly due to data filtering. With the Mantis F5 scanner this value is below 2 mm on average. The Creaform HandySCAN 700 shows again the best results, compared to the reference system.

The sphere-spacing errors (Fig. 4) show systematic positive or negative deviations for almost all sensors. These effects are particularly pronounced with the Mantis F5 as well as with the DPI-7 (on the average approx. 1% of the distance). The afore-mentioned scale error is to be assumed as the main reason for this behaviour. The DPI-8 shows a slight im-

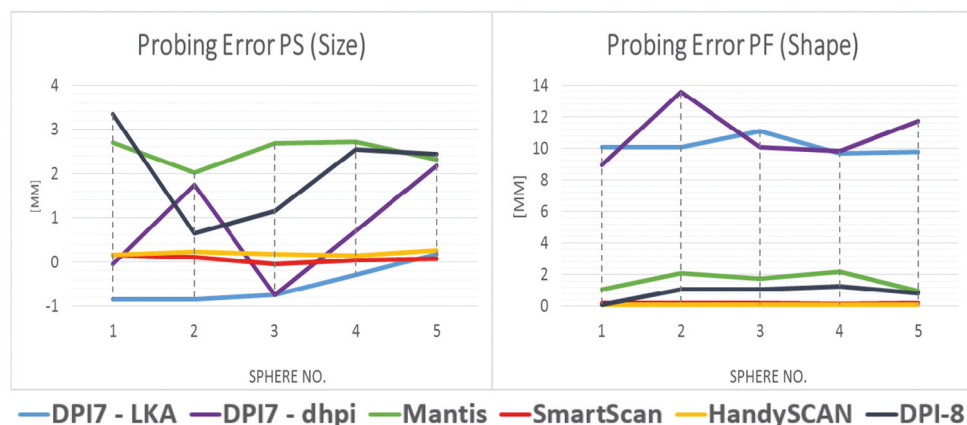


Fig. 3: Quality parameter probing error (PS / PF) equivalent to VDI/VDE 2634, part 3.

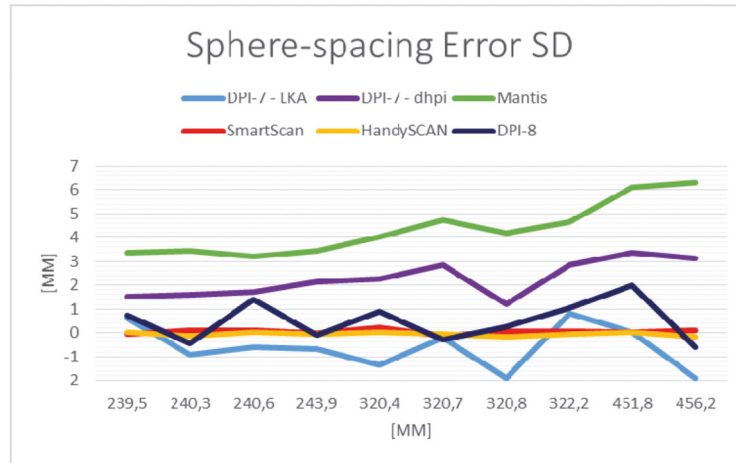


Fig. 4: Quality parameter sphere-spacing error (SD) equivalent to VDI/VDE 2634, part 3 for the distances between the spheres (x-axis).

provement compared to the DPI-7. This test procedure also shows the high quality of the Creaform sensor HandySCAN 700, the results of which are absolute comparable to those achieved by the fringe projection system.

5.2 Reference Body Granite Slab

The charts of Fig. 5 show the results of the flatness measurement error RE for the reference body “granite slab”. A dependence between the arrangement of the object surface (granite slab with a coincidental pattern, consisting of bright and dark areas) and the measurement principle of the particular sensor is also visible here. It is recognizable from the data of the structured light projectors (smartSCAN and ATOS) that both systems are able to measure the surface with a similar quality, although the number of acquired points differs significantly. It might be assumed that one reason for this lies in the different principles of the scanners’ projector units, a current LED lighting with the smartSCAN respectively halogen light with the ATOS, while another reason might be the different resolutions of the cameras.

The granite slabs measured by photo triangulation with the HandySCAN 700 shows a flatness measurement error which is comparable to the results of the structured-light pro-

jectors. The natural texture of the granite slab here surely meets the requirements of stereophotogrammetry. Systems with active projection are disadvantaged in this case. An interesting effect also can be seen with the DPI-7 and DPI-8 scanners: obviously there is no direct dependance between the number of points in the cloud and the surface quality.

5.3 Reference Body Testy

The results of the 3D comparisons between the systems tested and reference system (ATOS) are summarized in Tab. 2 and illustrated in Fig. 6. The 3D comparison of the two reference systems (ATOS and smartSCAN) shows very small average deviations of less than 10 μm , and even the span, which is calculated from the difference between the average negative and positive deviations, is very low (approximately 30 μm). Thus, the good quality of this two structured light projection systems is confirmed as a reference system with superior accuracy. However, the best result has been achieved with the HandySCAN 700, since the deviation to the reference is in the range of the smartSCAN. No other handheld 3D scanner could achieve these accuracies. Furthermore, some other systems (DPI-7, DPI-8 and Artec Spider) could not completely capture the Testy

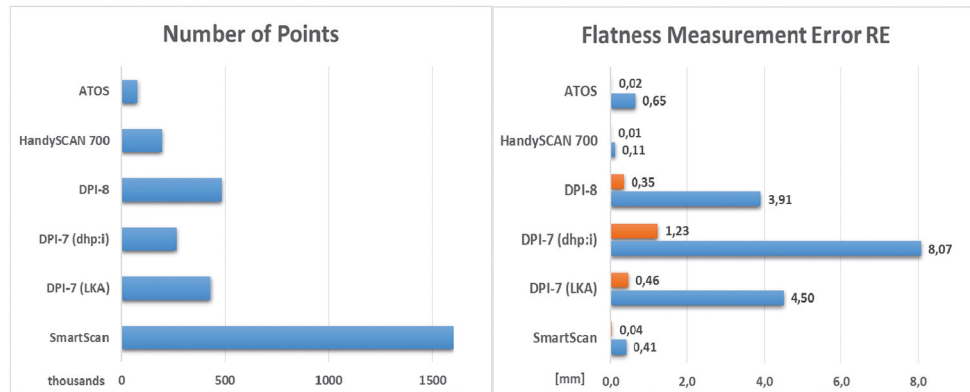


Fig. 5: Quality parameter flatness measurement error (RE) equivalent to VDI/VDE 2634, part 2. Right fig.: BLUE – flatness measurement error, ORANGE: standard deviation (mm).

due to the complex geometry and all handheld structure light systems showed obvious systematic scale differences (Fig. 6).

5.4 Reference Body Einstein Bust

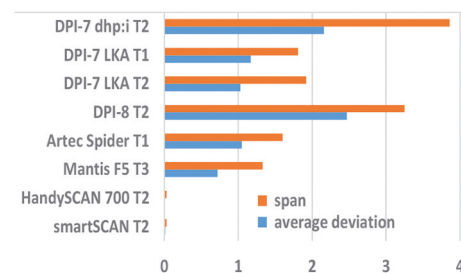
The results of the 3D comparisons with the Einstein bust are summarized in Tab. 3 and presented in Fig. 7 in colour. The best numerical and visual result is reached by the HandySCAN 700. From the DPI 7/DPI-8 and the Artec Spider data, only models containing big holes could be created. The high deviations in the DPI-7/DPI-8 data show that they cannot cope with the homogeneous white surface of the Einstein bust. For this object the two higher-assessed systems, Mantis F5 and Artec Spider, could not achieve the specifications quoted by the manufacturer in these tests.

5.5 Reference Body Wheel Hub

The most complex and difficult reference body concerning this investigation is the wheel hub. Due to its symmetry, it can only be aligned clearly using a few small parts of the object, a grooved profile on the back and some elevated letters inside. If these parts were not visible in the data (e.g. of the DPI-7 LKA) due to low scan resolution, the object could not be aligned and compared to the reference object. With the exception of the HandySCAN 700 none of the investigated systems could generate a complete model if the wheel hub was taken only from one position and not rotated. The 3D models from DPI-7/DPI-8 and from Artec Spider were not useful, since visually unacceptable models were generated. The final 3D models and the colour-coded differences between test data and reference mod-

Tab. 2: Average deviations (\emptyset dev.) (mm) of the Testys – 3D comparison in Geomagic between reference (ATOS, # of triangles ca. 250.000) and test system, T = Testy, Sp = span.

System	# triangles	\emptyset dev.	Sp
A: DPI-7 dhp:i T2	588,221	2.16	3.86
B: DPI-7 LKA T1	466,114	1.17	1.81
C: DPI-7 LKA T2	448,993	1.03	1.92
D: DPI-8 T2	452,086	2.47	3.25
E: Artec Spi. T1	2,621,776	-1.05	1.60
F: Mantis F5 T3	4,371,360	0.72	1.33
G: HandySC. T2	1,236,568	0.01	0.03
H: smartSC. T2	1,156,735	-0.01	0.03



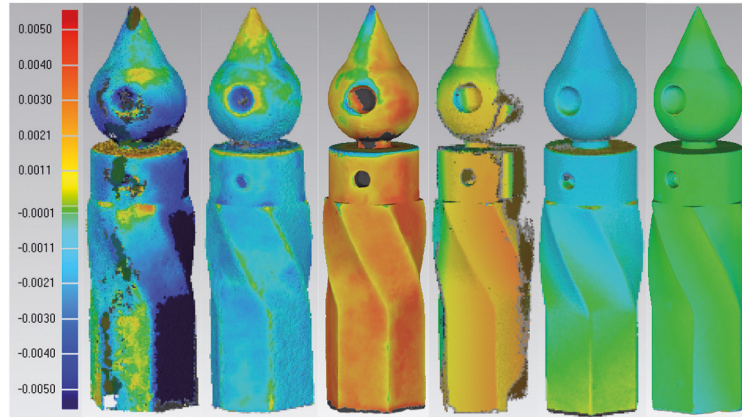


Fig. 6: Deviations (m) of the different Testys (3D comparison in Geomagic test data vs. reference) (from left to right) – DPI-7 dhp:i T2 (A), DPI-7 LKA T1 (B), DPI-8 T2 (D), Artec Spider T1 (E), Mantis F5 T3 (F) and HandySCAN 700 T2 (G).

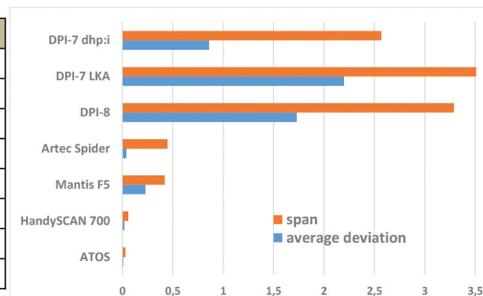
el are shown in Fig. 8. This shows that the HandySCAN 700 delivered the best numerical and optical results. The visual impression is also confirmed by the results in Tab. 4, i.e. the HandySCAN 700 and the structured light projection system ATOS (here used for comparison) have the smallest average deviations. By contrast to this, the Mantis F5 shows significant systematic effects which might be caused by false scaling from system calibration. Mantis F5 and Artec Spider could not achieve the manufacturer's accuracy specifications. The other systems achieve the specified accuracy, but they are rather unsuitable for this technical application due to the optical quality of the generated model.

6 Conclusion and Outlook

In this contribution the results of the comparative geometrical accuracy tests for different handheld 3D scanners were presented. The tests demonstrated that the evaluated middle class scanning systems currently do not reach the accuracies and the quality of the reference data produced by high-end structured light systems. The Creaform HandySCAN 700 is an exception, since the results of this high-end system are very close to the reference systems, i.e. it is a portable and flexible 3D scanner with almost the same accuracy as static structure light systems. However, it should be noted that not all of the selected reference bodies corresponded optimally to the typical range of applications of the tested 3D scanners. In principle, the handling of these systems is simple.

Tab. 3: Average deviations (\emptyset dev.) (mm) of the Einstein bust – 3D comparison in Geomagic between reference (smartSCAN, # of triangles 1,110,302) and test system, Sp = span.

System	#triangles	\emptyset dev.	Sp
A: DPI-7 dhp:i	175,696	0.86	2.57
B: DPI-7 LKA	167,556	2.20	3.53
C: DPI-8	497,978	1.73	3.29
D: Artec Spider	1,299,298	0.04	0.45
E: Mantis F5	8,089,764	0.23	0.42
F: HandySCAN	1,100,302	0.02	0.06
G: ATOS	769,262	0.01	0.03



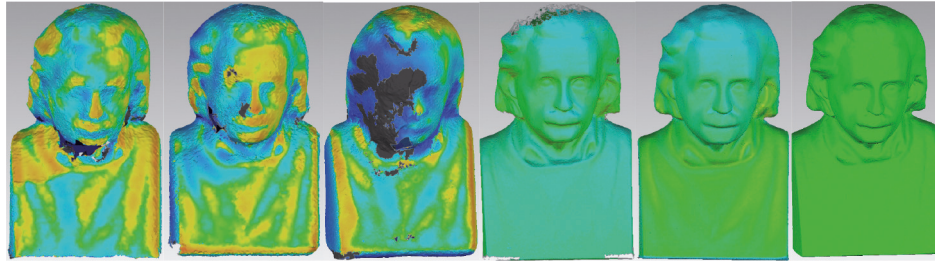


Fig. 7: Deviations (m) of the different Einstein busts (3D comparison in Geomagic test data vs. reference) (from left to right) – DPI-7 dhp:i (A), DPI-7 LKA (B), DPI-8 (C), Artec Spider (D), Mantis F5 (E) and HandySCAN 700 (F). Scale identical to Fig. 6: green 0.1 mm, red +5 mm, blue -5 mm.

However, the scanning by slow, homogeneous movements – around and over the object to be recorded – requires appropriate user experience for keeping a permanent matching between the scanned point clouds. The acquisition speed of a few minutes for each object is quite high for all presented systems.

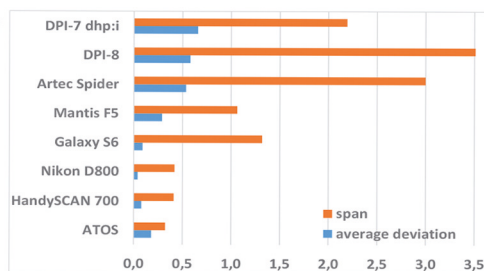
Following the guideline of VDI/VDE 2634, part 2 and 3, the determined quality parameters (probing error and sphere-spacing error) gave a clear indication that the instrument scale was not precisely determined for some handheld scanners and/or that the sensor is possibly not stable due to a mechanically unstable structure. Procedures for the field check and/or simple self-calibration achievable by any user are therefore both meaningful and necessary. The result of the flatness measurement error tests document that the image-based acquisition procedure with the HandySCAN 700 has very small deviations compared to the structured light systems, while the systems with active projection show deviations that are larger than those of the reference sys-

tems by a factor of 8-50. It can be concluded that the signal to noise ratio of the active scanning systems needs significant improvements. Comparing the latest DotProduct systems, the DPI-8 provides an improvement with respect to the DPI-7 only in the tests concerning the guideline VDI/VDE 2634.

The two systems Mantis F5 and Artec Spider settled in the middle price segment could not satisfy the accuracy specifications of their manufacturers in the investigations using the reference bodies Testy, wheel hub and Einstein bust. However, beside the pure accuracy values (average deviation and span), the visual quality and the completeness of the scanned test objects must also be considered as a criterion for the evaluation of the entire quality of an examined system. The visual quality of the models was better with the Mantis F5 than with the other handheld scanners. Using the data of the DPI-7/DPI-8 and the Artec Spider, no satisfying models of the reference bodies could be generated due to many holes in the dataset and noise of the point clouds.

Tab. 4: Average deviations ($\bar{\sigma}$ dev.) (mm) of the wheel hub – 3D comparison in Geomagic between reference (smartSCAN, # of triangles 6,352,367) and test system, Sp = span.

System	# triangles	$\bar{\sigma}$ dev.	Sp
A: DPI-7 dhp:i	454,234	0.66	2.19
B: DPI-8	436,625	0.58	3.56
C: Artec Spider	1,193,774	0.54	3.00
D: Mantis F5	5,494,803	0.29	1.06
E: HandySCAN	7,257,962	0.08	0.41
F: ATOS	642,677	-0.18	0.33



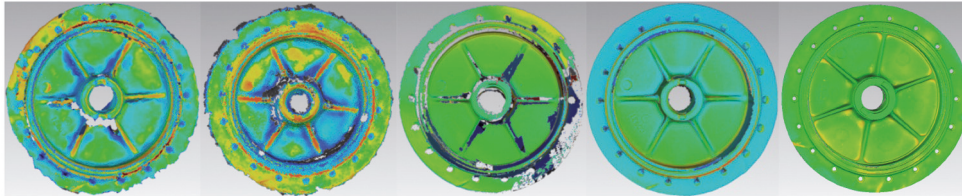


Fig. 8: Deviations (m) of different wheel hubs (3D comparison in Geomagic test data vs. reference) (from left to right) – DPI-7 dhp:i (A), DPI-8 (B), Artec Spider (C), Mantis F5 (D) and HandySCAN 700 (E). Scale identical to Fig. 6: green 0.1 mm, red +5 mm, blue -5 mm.

Although it is not documented in these investigations, it was also noticed that the quality of a model generated with a specific system has a strong dependence on the experience of the operator. Future investigations should be carried out in the context of alternative test scenarios, e.g. with larger reference bodies. Moreover, using those reference bodies and a test field a comparison with laser scanner measurements seems to also be meaningful, as generally the handheld systems will be able to fill a gap between high precision structured light systems (in comparison to high-end and middle class handheld 3D scanners) and terrestrial laser scanners (in comparison to low-cost handheld 3D scanners).

Acknowledgements

The authors acknowledge the deployment of the 3D scanning systems by the State Office of Criminal Investigations Hamburg, Dr. Hesse and Partner Engineers (Hamburg), Hanack und Partner (Hamburg), AllTerra Deutschland GmbH (Schenefeld), and MexConsult (Bredstedt). In particular, the energetic support during the data acquisition by the students of the master study program Geomatics of HCU Hamburg, the students of the Bochum University of Applied Sciences and the staff of the State Office of Criminal Investigations Hamburg is gratefully acknowledged. Furthermore, the authors thank MARTIN MISGAISKI-HASS (Humboldt University Berlin) for providing the four test bodies Testy.

References

- ADAMS, J.W., OLAH, A., MCCURRY, M.R. & POTZE, S., 2015: Surface Model and Tomographic Archive of Fossil Primate and Other Mammal Holotype and Paratype Specimens of the Ditsong National Museum of Natural History, Pretoria, South Africa. – *PloS one* **10** (10): e0139800.
- AHERN, C. & SPRING, R., 2015: Handheld 3D Capture. – *GeoInformatics* **18** (2): 18–19.
- AICON3D, 2016: <http://aicon3d.com/products/aicon-scanner.html> (5.11.2016).
- AMETEK, 2016: Creaform announces major design and performance upgrade for its new MetraSCAN 3D laser scanner. – http://www.ametek.com/pressreleases/news/2016/april/creaformannouncemajordesignandperformanceupgrade?news_lang=en (31.10.2016).
- ARTEC3D, 2016: <https://www.artec3d.com/3d-scanner/artec-spider#specifications> (2.11.2016).
- BATHOW, C. & BREUCKMANN, B., 2011: High-definition 3D acquisition of archaeological objects: An overview of various challenging projects all over the world. – 23rd CIPA Symposium: 12–16.
- BESL, P.J. & MCKAY, N.D., 1992: Method for registration of 3-D shapes. – *Robotics-DL tentative*, International Society for Optics and Photonics: 586–606.
- BOEHM, J., 2014 Accuracy Investigation for Structured-light Based Consumer 3D Sensors. – PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2014** (2): 117–127.
- CHAN, T.O., LICHTI, D.D., BELTON, D., KLINGEISEN, B. & HELMHOLTZ, P., 2016: Survey Accuracy Analysis of a Hand-held Mobile LiDAR Device for Cultural Heritage Documentation. – PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2016** (3): 153–165.
- CREAFORM, 2016: <http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d> (2.11.2016).
- DOTPRODUCT, 2016: https://www.dotproduct3d.com/assets/pdf/dotproduct-brochure_WEB.pdf (2.11.2016).

- FRIEDMAN, C., JOEL, B.W., SCHULT, A.R. & LEFTWICH, M.C., 2015: Noninvasive 3D Geometry Extraction of a Sea Lion Foreflipper. – *Journal of Aero Aqua Bio-Mechanisms* **4** (1): 25–31.
- GEOMAGIC, 2016: <http://www.geomagic.com/en/> (2.11.2016).
- GOM, 2016: <http://www.gom.com/de/messsysteme/atos.html> (2.11.2016).
- HIERONYMUS, J., MISGAISKI, M. & REULKE, R., 2011: Genauigkeitsvergleich von 3D-Sensoren aus dem Freizeit- und Spielmarkt. – LUHMANN, T. & MÜLLER, C. (eds.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011*: 232–241, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- INZERILLO, L., DI MINO, G., DI PAOLA, F. & NOTO, S., 2015: The Diagnostics of Road Surface Distresses Through Image-Based Modeling Techniques. – *Experimental Survey on Laboratory-Rutted Samples. Life Safety and Security* **3** (8): 31–35.
- JAHRAUS, A., LICHTI, D. & DAWSON, P., 2015: Self-Calibration of a Structured Light Based Scanner for Use in Archeological Applications. – *SPIE 9528, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII*: 95280E; doi: 10.1117/12.2184607.
- KERSTEN, T., MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M. & STERNBERG, H., 2009: Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2009** (4): 301–316.
- KERSTEN, T., KELLER, F., SAENGER, J. & SCHIEWE, J., 2012: Automated Generation of an Historic 4D City Model of Hamburg and its Visualisation with the GE Engine. – IOANNIDES, M., FRITSCH, D., LLEISSNER, J., DAVIES, R., REMONDINO, F. & CAFFO, R. (eds.): *EuroMed 2012 – International Conference on Cultural Heritage, Lecture Notes in Computer Science* **7616**: 55–65, Springer, Berlin und Heidelberg.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2012: Image-Based Low Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. – IOANNIDES, M., FRITSCH, D., LLEISSNER, J., DAVIES, R., REMONDINO, F. & CAFFO, R. (eds.): *EuroMed 2012 – International Conference on Cultural Heritage, Lecture Notes in Computer Science* **7616**: 1–10, Springer, Berlin und Heidelberg.
- KERSTEN, T., OMELANOWSKY, D. & LINDSTAEDT, M., 2016a: Investigations of Low-Cost Systems for 3D Reconstruction of Small Objects. – IOANNIDES, M., FINK, E., MOROPOULOU, A., HAGEDORN-SAUPE, M., FRESA, A., LIESTÖL, G., RAJCIC, V. & GRUSSENMEYER, P. (eds.): *EuroMed 2016, Part I, Lecture Notes in Computer Science* **10058**: 1–12, Springer International Publishing AG.
- KERSTEN, T., PRZYBILLA, H.-J., LINDSTAEDT, M., TSCHIRSCHWITZ, F. & MISGAISKI-HASS, M., 2016b: Comparative Geometrical Investigations of Handheld Scanning Systems. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences* **XLI-B5**: 507–514.
- KHOSHELHAM, K., 2011: Accuracy Analysis of Kinect Depth Data. – *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (5/W12): 133–138.
- OR3D, 2016: <http://www.or3d.co.uk/wp-content/uploads/2016/09/F5-Short.pdf> (5.11.2016).
- OUMET, C., GREGG, J., KRETZ, S., CHANDLER, C. & HAYES, J., 2015: Documentation and dissemination of the sculptural elements of Canada's Parliamentary Buildings: Methodology development and evolution, a case study. – *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40** (5): 347–352.
- RAU, J.Y. & YEH, P.C., 2012: A semi-automatic image-based close range 3D modeling pipeline using a multi-camera configuration. – *Sensors* **12** (8): 11271–11293.
- REULKE, R. & MISGAISKI, M., 2012: Test body “Testy” for Laser Scanning and Optical Systems. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2012** (6): zum Titelbild.
- SLIZEWSKI, A., FRIESS, M. & SEMAL, P., 2010: Surface scanning of anthropological specimens: nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems. – *Quartär* **57**: 179–187.
- STAROSTA, D., 2016: Untersuchung der Einsatzfähigkeit des 3D-Scanners „HandySCAN 700“. Bachelor thesis, study program Geomatics, HafenCity University Hamburg, March.
- VDI/VDE, 2002: *Optical 3-D Measuring Systems – Optical Systems based on Area Scanning. VDI/VDE Guideline 2634, Part 2*, Beuth Verlag, Berlin.
- VDI/VDE, 2006: *Optical 3-D Measuring Systems – Multiple View Systems based on Area Scanning. VDI/VDE Guideline 2634, Part 3*, Beuth Verlag, Berlin.
- WRONA, M., 2014: Using Optical NIR Handheld Scanner for Close Range 3D Mapping. – *The 9th International Conference on Environmental Engineering 2014, Procedia Engineering*, Vilnius, Lithuania.
- WUJANZ, D., WEISBRICH, S. & NEITZEL, F., 2011: 3D-Mapping mit dem Microsoft® Kinect Sensor – erste Untersuchungsergebnisse. – LUHMANN, T. & MÜLLER, C. (eds.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011*: 274–283, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- ZEISS, 2016: <http://optotechnik.zeiss.com/> (2.11.2016).

ZHANG, W., WANG, C. & XI, X., 2015: 3D Scan of Ornamental Column (huabiao) Using Terrestrial LiDAR and Handheld Imager. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **40** (5/W7): 491–494.

Addresses of the Authors:

THOMAS P. KERSTEN, MAREN LINDSTAEDT, HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Überseeallee 16, D-20457 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5343, e-mail: thomas.Kersten, maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, Labor für Photogrammetrie, Lennerhofstraße 140, D-44801 Bochum, e-mail: heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

Manuskript eingereicht: Oktober 2016

Angenommen: Oktober 2016

3. Objektmodellierung auf Basis statischer Scans

Im Kapitel 3 wird der kummulative Teil der Dissertation mit den beiden Fachartikeln „**Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications**“ (Kap. 3.1) und „**Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai**“ (Kap. 3.2) über die Objektmodellierung durch CAD und durch Dreiecksvermaschung fortgeführt.

3.1. Objektmodellierung durch CAD

Kapitel 3.1 veröffentlicht in International Journal of Architectural Computing, Vol. 5, Heft 2 (ISSN 1478 0771) als:

Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications

Autoren: Thomas P. Kersten

HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

Publikationsverlauf: eingereicht Februar 2007, akzeptiert April 2007, publiziert Juni 2007

Vollständige Referenz: Kersten, Th., 2007. Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. International Journal of Architectural Computing, Special Focus on Cultural Heritage, Issue 02, Volume 05, Published by Multiscience, 339-354.

Internet link: <http://www.architecturalcomputing.org/contents/vol5/>
https://www.researchgate.net/publication/30871549_Virtual_Reality_Model_of_the_Northern_Sluice_of_the_Ancient_Dam_in_Marib_Yemen_by_Combination_of_Digital_Photogrammetry_and_Terrestrial_Laser_Scanning_for_Archaeological_Applications

Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications

Thomas P. Kersten

Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications

Thomas P. Kersten

In this paper the potential of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning in combination is demonstrated in the recording and 3D CAD construction of the northern sluice of the ancient dam in Marib/Yemen, which is located approx. 150 kilometre east of the capital city Sana'a, close to the inner Arabic desert. The Yemeni government proposed for initiation of the building into the list of the UNESCO world cultural heritage. This described project work is a co-operation between the Commission for Archaeology of Non-European Cultures (KAAK) Bonn of the German Archaeological Institute (DAI) and the department Geomatics of the HafenCity University Hamburg. The object recording was carried out in January 2006 with the digital SLR camera Fujifilm FinePix S2 pro and the terrestrial laser scanner Trimble GS100 during the archaeological excavations. The northern sluice was reconstructed and visualized as a computer-based 3D CAD model for archaeological investigations (as-built-documentation of the excavations) and for future tourism advertising and publication purposes.

I. Introduction

Yemen offers extensive archaeological potential, but many important archaeological sites are still unexplored to a large extent, as for example those of the antique Sabaeen capitol city Marib. In the context of the main research field “antique water management” the remains of the antique dam of Marib have been comprehensively excavated, analysed and restored by the German Archaeological Institute since 2002 ([1], [2]) despite recent political events such as a kidnapping in December 2005. The project is financed by the German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development and the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. The organisation of the project is performed by the Commission for Archaeology of Non-European Cultures (KAAK) Bonn of the German Archaeological Institute (DAI).

The three-dimensional data acquisition and digital construction of a potential world cultural heritage site needs complex data volumes, since complete geometry as well as surface characteristics of the recording objects are specifically required, in order to be able to generate as realistic as possible a virtual model. Therefore, a combination of digital photogrammetry and laser scanning was used for the recording of the northern sluice (Figure 1), in order to use the specific advantages of each respective recording system and to be able to judge the effectiveness of the evaluation procedures in cultural heritage applications. As a result of the recording a three-dimensional visualized and/or animated model of the northern sluice is available, which additionally can be offered as the base for a subsequent 3D geo-information system (GIS). How one can use a three-dimensional, visualized model as an optimal base for a 3D GIS was realized for the Geoglyphs of Nasca Palpa in Peru, which were mapped by photogrammetric methods and represented afterwards in a 3D GIS [3].

Photogrammetry and laser scanning are important instruments for the documentation of cultural monuments. The required precision from the archaeology is about $\pm 10\text{cm}$ for object points, since archaeology is mainly focussed on interpretation and visualization of historic buildings. Combined photogrammetric and laser scanning data processing was already accomplished at HafenCity University for the project West Tower ensemble in Duderstadt (Lower Saxony, Germany) with the program PHIDIAS [4]. Due to the combined graphic display of digital, orientated images and geo-referenced 3D point clouds of a laser scanner the data processing using PHIDIAS has proven to be very efficient. As an example for another cultural heritage application the voluminous geometrical documentation and visualization of the temple ruin Athribis of the lion goddess Rept in northern Egypt is summarized in [5].



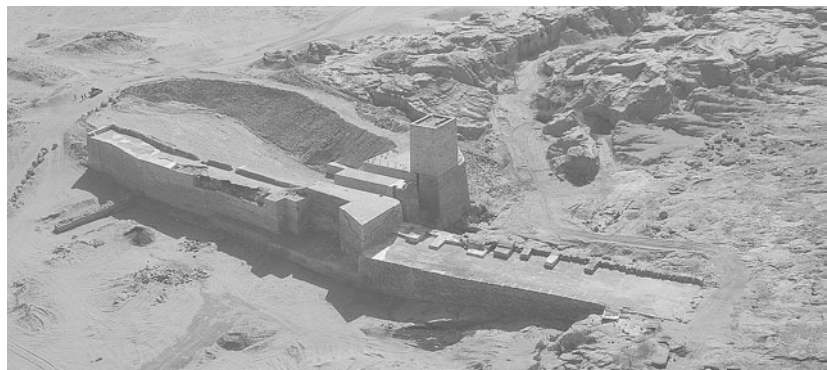
◀ Figure 1: Overview image of the northern and southern sluice of the ancient dam in Marib/Yemen. (Photo: Google Earth)

2. The recorded object – northern sluice of the ancient dam in Marib/Yemen

The former Sabaeer capitol city Marib is located approx. 150 km east of the Yemeni capital Sana'a in the transient area of the Yemeni highland to the inner Arab desert Ramlat as-Sab'atayn.

In the year 548 A.D. the ancient community established the large dam of Marib, a masterwork of engineering architecture at that time. Thus, the inhabitants of southern Arabia could use the periodically occurring monsoon rain as tide irrigation for agriculture. Typically twice per year the violent rains were captured by the dam and led into a comprehensive irrigation system. The water masses were reserved by an earth dam with a so-called stone ticking, which was built at a narrowed location of the Wadi Dhana. Hence, the task of the dam consisted of catching and supporting the incident water off flow. However, no water reservoir was to be created, but the ground-water level of the area should slowly have increased. At the northern and southern end of the dam water gates (sluices) existed (Figure 1), with which the supplies of water could be regulated for the cultivated areas via the main channels [1]. The northern sluice of the old dam (Figure 2), which was recorded in this project, is located at the foot of the adjacent mountain range. The main walls of the building bordered a basin, in which the arriving water masses were supported and later flowed into an artificial canal system. From this the water flow was well distributed via twelve smaller canals into the oasis land. The overflow wall served as flood discharge.

► Figure 2: Oblique aerial image of the northern sluice of the ancient dam in Marib/Yemen. (Photo: B. Vogt, KAAK, DAI)



On the one hand the water from the mountains could be accumulated with this water management system, in order to prevent inundations on the oases. On the other hand despite increasing sedimentation in the area causing a rise in levels for the cultivated lands irrigation was guaranteed. Consequently, the irrigation level continuously rose after each flooding [3]. Nevertheless, in order to be able to supply the agriculture surfaces with sufficient water, the buildings had to be raised to achieve a higher level than the irrigation level. From the places in the northern sluice, in which the stone boarding is missing,

it is clearly recognizable that the wall of the catchment's basin of the water off flow was increased due to the sedimentation and the rising level of the water. It was foreseen by constant rising of the sediment layers that the dam could not sustain the masses and the pressure any longer. Consequently, after a short period of use a break of the dam finally occurred between 575 and 600 A.D., which was no longer be repaired. Thereafter, water management stopped and lead to the depopulation of the once thriving oasis [2].

3. Systems used for object recording

The recording of the dam was performed with a commercial digital SLR camera Fujifilm FinePix S2 pro and the terrestrial laser scanning system Trimble GS100. The S2 possesses a CCD chip with a sensor of $23.3 \text{ mm} \times 15.6 \text{ mm}$, which offers a maximum interpolated resolution of $4256 \times$ of 2848 pixel, which yields a file size of approx. 35 MB per image in TIFF. At this resolution 28 photos can be stored on one Compact Flash Card with 1 GB storage capacity. The camera was used with a Nikkor lens with the focal length of 28 mm.

The 3D laser scanning system GS100 is manufactured by Trimble S.A., France and consists of a laser scanner, accessories (Figure 3) and appropriate software for data acquisition and post processing. The optimal scanning range is between 2–100 m. The panoramic view scanner (field of view 360° horizontal, 60° vertically) offers an uninterrupted panoramic capture of a scene of $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ up to $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ indoors or outdoors. The resolution of the scanner is 0.002gon (Hz/V). The laser point has a size of 3 mm in 50 m distance, whereby the standard deviation of a single distance measurement is 6 mm. The distance measurements are performed by pulsed time-of-flight laser ranging using a green laser (532 nm, laser class II or III). The system is able to measure up to 5000 points per second.

Figure 3 shows the 3D laser scanning system Trimble GS100 (weight 13.5 kg) with accessories, consisting of a rugged flight case and a notebook for controlling the unit during data acquisition. The usage of an efficient power generator is recommended for field work, when mains power cannot be obtained.

Investigations into the accuracy behaviour of the terrestrial laser scanning system Trimble GS100 are described in [7].

4. Photogrammetric object recording and laser scanning

The object recording was performed with a team of four people from the HafenCity University Hamburg within a three week campaign from December 29th 2005 to January 17th 2006. First, a local 3D network and control points for photogrammetry and laser scanning were measured with the Leica tacheometer TCRP 1201. From a previous diploma thesis of the department Geomatics fixed points were already available for the transformation into the UTM coordinate system [8]. Due to reduced transportation facilities,

► Figure 3: Terrestrial 3D laser scanning system Trimble GS100 from the HafenCity University Hamburg.



sufficient tripods could not be brought for the geodetic net measurement. The network had to be measured without forced centering on tripods, which slightly reduced the precision. In addition, the zenith angle measurement was significantly affected by the high refraction. But with respect to the later applications in archaeology the precision losses are quite justifiable.

The photogrammetric recording was carried out with the SLR camera Fuji S2 in multi image triangulation mode. In order to obtain a good camera configuration around the object, a 5 m high ladder was used for additional camera stations (Figure 4a). In total, 458 images of the entire dam were recorded, although for the subsequent evaluation only 138 were used. 53 circular targets, which were generated in AutoCAD, were used as photogrammetric control points, whose coordinates were determined geodetically in a 3D network.

Using the laser scanner Trimble GS100 (Figure 4b) the 3D geometry of the northern sluice could be scanned and additionally intensity values of the laser beam and the RGB values of the internal video camera were stored for each 3D point. Thereby, the initialization of the scanner as well as the definition of the respective scanning station was performed using the scanning program PointScape V2.0. After scanner initialization the scanning area was specified in real time via the displayed video frame from the scanner's internal camera. This process was particularly recommendable, in order to avoid unnecessary data volumes from the environmental area of the dam. For the complete object scanning 19 scanner stations in total were needed. Moreover, all visible control points and registration points, which were equipped with spheres, were scanned additionally from each scanner station. All control points were determined in the geodetic network



◀ Figure 4: Photogrammetric recording on a mobile ladder (a) and terrestrial laser scanning in Marib/Yemen (b).

measurement. These points were used later for the registration and geo-referencing of the scans in the UTM coordinate system.

5. Data processing

5.1. Geodetic 3D network adjustment

The program system Panda (GeoTec, Laatzen, Germany) offers computation and adjustment of geodetic 3D networks including the computation of relevant network specific parameters for the analysis, optimization and evaluation of 3D nets. The three-dimensional network adjustment delivers control point coordinates for the subsequent geo-referencing of the recorded photogrammetric images and the point clouds from laser scanning. In the three-dimensional net adjustment a standard deviation for the horizontal and vertical angle measurement of approx. 3 mgon and for the distance measurements a standard deviation of approx. 3 mm was achieved. For the adjusted UTM coordinates of the network stations a maximum standard deviation of 1 mm was determined. For the control point measurements the largest residual in planimetry amounts to 10 mm, while the average residual was approx. 2 mm. Due to the more inaccurate zenith angle measurements the height coordinates showed higher residuals, i.e. the largest residual for a photogrammetric control point was 6 mm, while the average value was 3.5 mm.

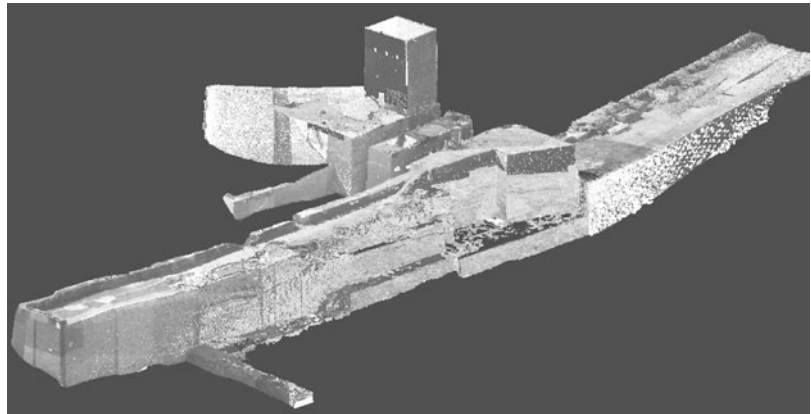
5.2. Registration and geo-referencing of scans

The manual registration and geo-referencing of the three-dimensional point clouds of each laser scanner station was accomplished with the software RealWorks Survey 5.0 (RWS). The 19 scanner stations were registered using at least three of the 22 control and tie points (spheres).

The precision of the registration amounted to maximally ± 11.7 mm (RMS) per station. Subsequently, the entire registered point cloud could be geo-referenced into the UTM system with a precision of 1cm for the transformation using four control points in total. This achieved precision easily fulfils the requirements for object construction in archaeological applications.

Subsequently, the entire point cloud (28 million points) (Figure 5) was cleaned up, i.e. all redundant points, which did not belong to the object like scaffolding or workmen, were deleted. Thus, the point cloud could be reduced to 21 millions points in total. For the object construction the parts/areas in the point cloud, which were required for data processing, were segmented and exported as ASCII file, in order to be able to be processed in PHIDIAS.

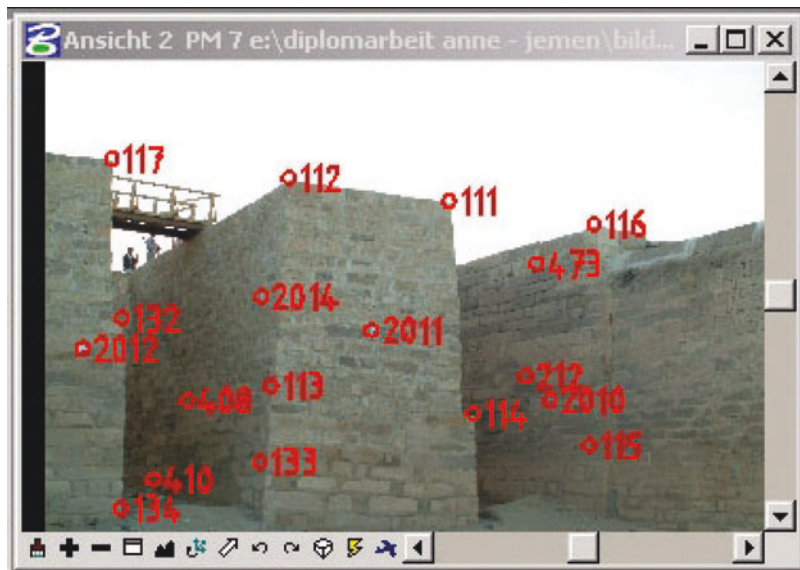
► Figure 5: Cleaned total point cloud of the northern sluice of the old dam in Marib/Yemen



5.3. Image orientation and camera calibration

The bundle block adjustment for image orientation including simultaneous camera calibration was accomplished with the program PHIDIAS, which is an MDL application of the CAD system MicroStation. Moreover, PHIDIAS offers the combined evaluation of orientated images with geo-referenced 3D point clouds of a laser scanner.

Before the final 3D object construction the orientation of 138 digital images and a camera calibration were accomplished in PHIDIAS. Figure 6 shows the principle of the photogrammetric measurements of the control and tie points. On average 27 image points were measured per image, while each object point was measured in ten images. Thus, a good connection of the multiple images within the triangulation block as well as a reliable point determination could be ensured. Systematic errors like the high lens distortion were compensated for in the camera calibration for the further evaluation. The average measuring precision of image points was $s_x = 7,7 \mu\text{m}$ and $s_y = 7,0 \mu\text{m}$, which corresponds to a measuring precision of ca. $1\frac{1}{2}$ pixel.



◀ Figure 6: Photogrammetric point measurements.

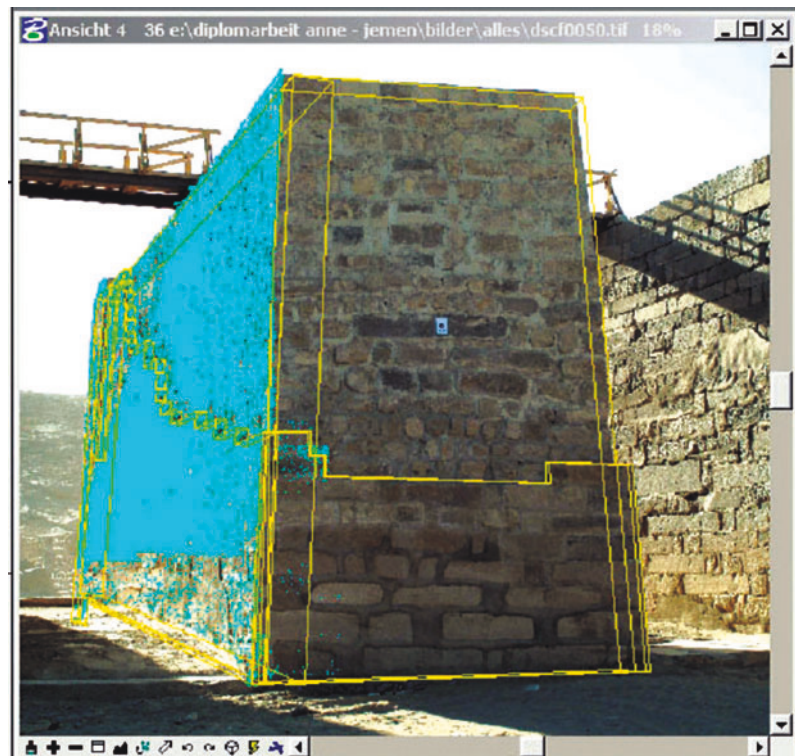
The precision of object points after adjustment was ± 8 mm. This obtained precision in image space was slightly worse than compared to precisions of other projects reached so far in digital architectural photogrammetry [9], since the definition of object points was not always completely clear with this antique building.

5.4. Object construction in PHIDIAS

Due to the combined representation of photogrammetric images and laser scanner data in PHIDIAS a 3D digitization of the object can be carried out then directly in a digital, orientated image using CAD elements such as points, lines, polygons or surfaces. Therefore, the point clouds of each facade generated in RWS were imported in PHIDIAS (Figure 7). Thereby, an orientated image supplies the XY object point coordinates, while the laser scanning point cloud delivers the Z-coordinate of the respective point. This procedure is called monoplotting. Thus, the 3D information of the point cloud is supplemented with the details of an image.

With the help of the point cloud an auxiliary plane can now be specified, so that the ray of each image point is cut with this plane and thus three-dimensional coordinates of this point can be measured in the image, and computed respectively. The auxiliary plane is defined by three points of the point cloud, which may not be on a straight line. Subsequently, the entire point cloud can be faded out, in order to ensure better distinction in the image and faster computing times. On this level the object with assistance of points, lines or polygons was then reconstructed (Figure 8a). The geometrical elements were stored as CAD objects in a DXF or a DWG format, so that a following data processing could be performed in AutoCAD, which was more familiar for the first author than MicroStation. Special

► Figure 7: Combined display of laser scanning data (blue), photogrammetric image and previously mapped vector data (yellow) in PHIDIAS.

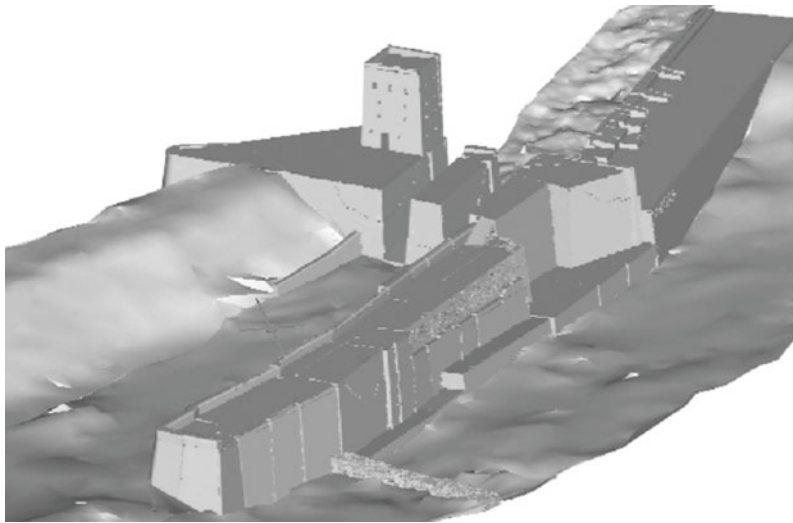


► Figure 8: Stone-by-stone mapping by monoplotting.



object characteristics like e.g. specific stones (Figure 8b) were measured in detail, which was particularly time-consuming.

Due to the object characteristics in the transition area of the water gate and wall it was also necessary for the modelling to generate a cylinder into the point cloud. After the construction of all object parts a complete 3D volume model of the northern sluice was available in AutoCAD, which is depicted in a rendered representation in Figure 9. A detailed description of the construction of the ancient dam is summarized in [10].



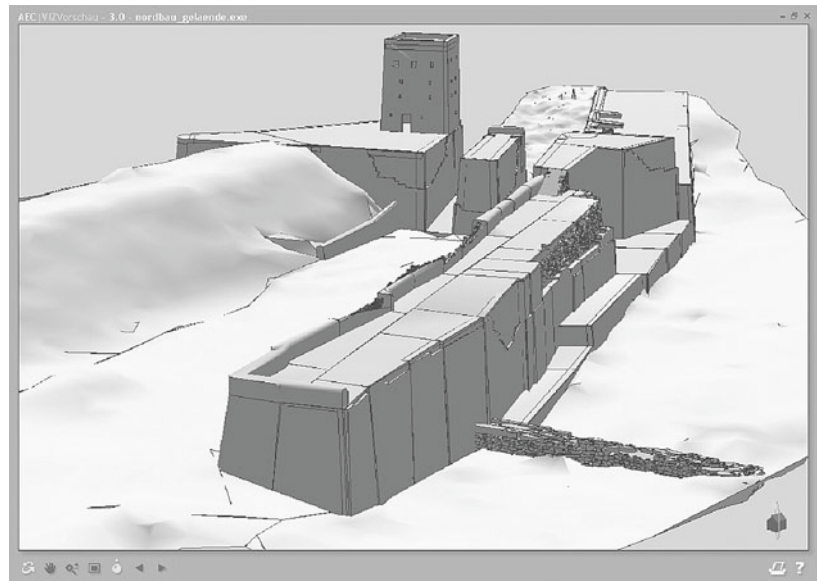
◀ Figure 9: Rendered representation of the virtual model of the northern sluice of the ancient dam generated by AutoCAD.

5.5. Visualisation

Firstly, for the interactive representation a visualization of the northern sluice was provided with AECViz, while in the second step the object was visualized as a video sequence with photo-realistic textures using Highlight pro. AECViz software is produced by Tornado Technologies Inc., Canada and produces simple visualization. However, the advantage of this program is the interactive representation of the object, i.e. the user can independently rotate the model, zoom in and out to receive a comprehensive impression of the object. With the import of DXF- or DWG files all in AutoCAD defined layer structures can be transferred to AECViz. However, the characteristics and colours of each individual layer can still be changed afterwards. Moreover, the solar radiation and the lighting conditions can be determined according to given countries and places. Finally, an EXE file can be generated, which can be executed on any windows-based computer (Figure 10).

Additionally, the building was visualized photo-realistically as a virtual reality model in a video sequence using the program Highlight pro V3. The software is divided into the two sub-programs Graph and Animate. In Graph a 3DS file can be first imported, which can be provided in AutoCAD from DXF or DWG formats. Since in Graph the processing of the file is based on triangles, all possible triangles in the model were generated during the import. The layer structure from AutoCAD can be transferred as well, however only 16 layers can be processed at once, so that the number of layers should be minimized to this number in AutoCAD prior to export. In order to simplify the definition of the layers, the user should arrange, that all object parts, which receive the same texture mapping later, should be placed on the same layer. Thus, the number of layers as well as the processing in Animate can be reduced. For

► Figure 10: Interactive virtual model of the northern sluice of the ancient dam generated by AECViz.



the texture mapping the photogrammetric images were used. After texture mapping was performed for all layers, a completely visualized model of the northern sluice was available (Figure 11 top). In addition, a fly through was generated as a video sequence of 69 seconds with Highlight pro, which consists of 2070 single video frames with a format of 800×600 pixel. Two images of this sequence are represented in Figure 11 (centre and bottom).

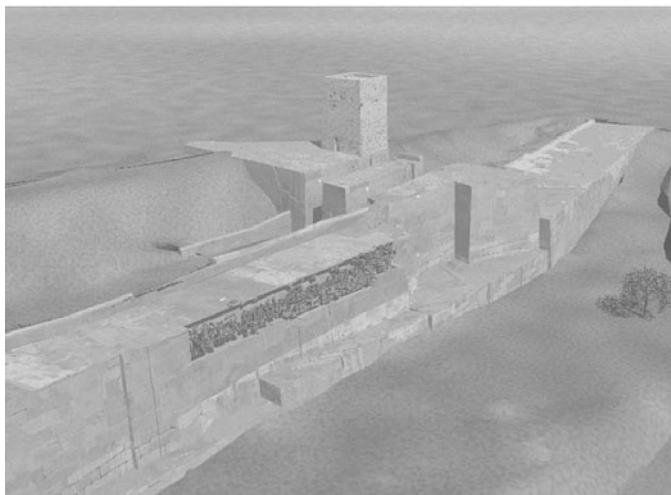
6. Time and cost aspects

On the basis of time and cost management the project could be judged with regards to economy and efficiency. In Figure 12 it can be seen that the photogrammetric evaluation and the object construction account for approx. 50% of the entire project. According to project experiences for instance a ratio of 1:10 can usually be assigned for object recording in relation to data processing for object modelling and construction. However, a ratio of 1:6 could be achieved for object recording and construction in this project due to the combined evaluation of photogrammetric and laser scanning data.

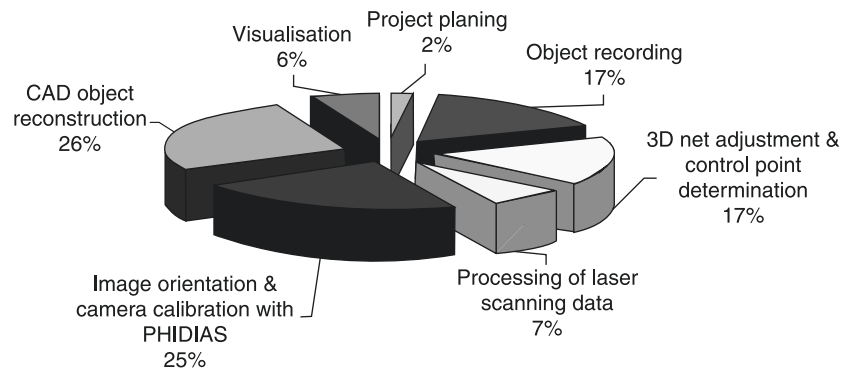
The expenditure of human labour for this project amounted to 459 hours in total. This corresponds to theoretical costs of approx. €30,000, which were deduced using appropriate current hourly wages for measuring assistant, technician and engineer. However, these are theoretical costs, but it can be finally stated that the expenditure and the costs of this project do not appear to correspond to real market conditions and to be economical for pure visualization applications. However, the exact and detailed evaluation of the ancient building represents high value as inventory documentation and thus for further archaeological investigations.



◀ Figure 11: Perspective scenes of the virtual model of the dam in Marib/ Yemen generated by Highlight pro V3.



► Figure 12: Expenditure of human labour for project ancient dam Marib/Yemen in percent.



7. Conclusions and outlook

The northern sluice of the antique dam in Marib/Yemen was completely recorded, modelled, reconstructed, visualized and successfully animated in three dimensions using a combination of digital photogrammetry and laser scanning. The use of a digital SLR camera Fuji S2 as well as the terrestrial laser scanner GSI00 from Trimble allowed an evaluation precision of approx. 1–2 cm, which thus fulfils the requirements of the archaeology of a maximum of ± 10 cm for visualisation and publication purposes (inventory documentation) of the virtual model. The combined evaluation was performed with the MicroStation PlugIn PHIDIAS from Phocad, Aachen, Germany. Due to the experiences of the authors in similar projects with different software, it can be stated that the PHIDIAS software permitted a very efficient evaluation for stone-by-stone mapping of the dam and the expenditure of time could be regarded as reduced due to the combined use of photogrammetric and laser scanner data. Since in archaeology, architectural photogrammetry and cultural heritage very high accuracies are not demanded, the use of digital SLR cameras proves particularly efficient. In comparison to metric cameras these cameras are characterised by small initial costs and ease of use and maintenance. Nevertheless, they offer a high accuracy potential of 1–2 cm for applications in architectural photogrammetry.

The use of a laser scanner is only recommended, if already appropriate equipment and the pertinent software are present, since the construction of antique buildings can also be realized only by architectural photogrammetry. Thus, the use of a laser scanner should be gauged before the start of the project due to saving of time, but as well due to the high initial costs. It could be shown in this project that the hybrid measuring and evaluation procedure offer a meaningful possibility of reconstructing and of visualizing the future world cultural heritage site as a virtual reality model, in order to inform about the object and to awaken public interest. In addition this provided and visualized 3D model offers an optimal base for the structure of a three-dimensional geo information system (GIS), which shall be realized in future work. In this way interested users can move interactively in the model and can attain further information about history, accretion or art-historical aspects of the dam.

Acknowledgements

The author would like to thank Anne Sommer, Hannes Sahl, Klaus Mechelke (all from HCU Hamburg) and Burkhard Blaich (University of Applied Science in Lippe and Höxter) for the support during the object recording in Marib/Yemen. The major work of 3D modelling and visualisation was carried out by Anne Sommer in spring 2006, which is grateful acknowledged.

References

1. Vogt, B., Towards a new dating of the great dam of Marib, Preliminary results of the 2002 fieldwork of the German Institute of Archaeology, in: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 34, 383–394, Oxford, 2004.
2. Vogt, B., The Great Dam, Eduard Glaser, and the chronology of ancient irrigation in Ma'rib, in: Sholan, A., Antonini, S. and Arbach, M., eds., *Sabaeen Studies, Archaeological, epigraphical and historical studies in honour of Yusuf M. 'Abdallah, Alessandro de Maigret, Christian Robin on the occasion of their sixtieth birthdays*, Naples-Sanaa, 501–520, 2005.
3. Lambers, K., *The Geoglyphs of Palpa, Peru: Documentation, Analysis and Interpretation*, PhD Thesis, University of Zurich, Faculty of Arts, 214 p., 2004.
4. Kersten, Th., Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications, in: Ioannides, M., Arnold, D., Niccolucci, F. and Mania, K., eds., *7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST (2006)*, Nicosia, Cyprus, 2006.
5. Obertreiber, N. and Stein, V., Dokumentation und Visualisierung einer Tempelanlage auf Basis von Laserscanning und Photogrammetrie, in: Luhmann, T. and Mueller, C., eds., *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik — Beiträge der Oldenburger 3D — Tage 2006*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 317–323, 2006.
6. Schmidt, J., *Die antike Wasserwirtschaft von Marib*, Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, Heft 18, 55–76, 1993.
7. Kersten, Th., Sternberg, H. and Mechelke, K., Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Trimble GS100, in: Gruen, A. and Kahmen, H., eds., *Optical 3D Measurement Techniques VII*, Vol. I, Vienna, 122–131, 2005.
8. John, F., *Anlage von 3D-GPS-Grundlagenetzen und topographische Geländeaufnahme durch kinematisches GPS im Jemen*, Unpublished diploma thesis, HafenCity University Hamburg, June, 97 pages, 2005.
9. Kersten, Th., Acevedo Pardo, C. and Lindstaedt, M., 3D Acquisition, Modelling and Visualization of north German Castles by Digital Architectural Photogrammetry, in: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV, Commission V, Part B2, 126–132, 2004.
10. Sommer, A., *3D — Erfassung und Modellierung des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning*, Unpublished diploma thesis, HafenCity University Hamburg, July, 106 pages, 2006.

Thomas P. Kersten
HafenCity University Hamburg
Department Geomatics
Hebebrandstrasse 1
22297 Hamburg, Germany
Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

3.2. Objektmodellierung durch Dreiecksvermaschung

Kapitel 3.2 veröffentlicht in PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 1/2009 (ISSN 1432-8364) als:

Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai

Autoren: Thomas P. Kersten^a, Maren Lindstaedt^a, Burkhard Vogt^b

^a HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

^b Deutsches Archäologisches Institut, Bonn

Publikationsverlauf: eingereicht Juni 2008, akzeptiert November 2008, publiziert Februar 2009

Vollständige Referenz: Kersten, Th., Lindstaedt, M., Vogt, B., 2009. Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 1, 79-90.

Internet link: http://www.dgpf.de/pfg/2009/Heft_1.pdf
https://www.researchgate.net/publication/233640027_Preserve_the_Past_for_the_Future_-_Terrestrial_Laser_Scanning_for_the_Documentation_and_Deformation_Analysis_of_Easter_Island's_Moai

Preserve the Past for the Future – Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai

THOMAS P. KERSTEN, MAREN LINDSTAEDT, Hamburg & BURKHARD VOGT, Bonn

Keywords: Cultural Heritage, Deformation, Modelling, Monitoring, Point Cloud, TLS

Summary: Since 1995, the Moai of Easter Island, the island's huge volcanic rock statues, have been protected as UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) World Cultural Heritage monuments, but so far, although the Moai are increasingly at risk of damage by exposure to wind and weather or by vandalism, they were never digitally documented and copied using an appropriate technique. The Department Geomatics of the HafenCity University Hamburg (HCU) started the documentation of the Moai in 2007 in cooperation with the German Archaeological Institute (DAI), Bonn, when the first three Moai sites were recorded by terrestrial laser scanning. In 2008 eight more Moai complexes were scanned. The long term goal of the project is to document and to catalogue the remaining Moai as well as assemble all relevant data into a Geographic Information System (GIS). Additionally, the analysis of possible deformation and the monitoring of conservation activities for selected Moai is an objective of the project. The recording of the statues by terrestrial laser scanning, the modelling into meshed 3D models and the texture mapping using high-resolution imagery are described in this paper. Furthermore, first tests for deformation analysis by 3D comparison of selected Moai were carried out. However, so far significant changes could not be detected for the short time interval of one year.

Zusammenfassung: *Bewahre die Vergangenheit für die Zukunft – Terrestrisches Laserscanning für die Dokumentation und Deformationsanalyse der Moai von der Osterinsel.* Seit 1995 stehen die Moai der Osterinsel, die sehr großen vulkanischen Steinfiguren der Insel, als Weltkulturerbe der UNESCO (Organisation für Ausbildung, Wissenschaft und Kultur der Vereinten Nationen) unter Schutz, aber bis heute wurden sie nie digital mit einer geeigneten Aufnahmetechnik dokumentiert und kopiert, obgleich die Moai in zunehmendem Maße der Gefahr einer Beschädigung durch Erosion von Wind und Regen oder durch Vandalismus ausgesetzt sind. Das Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg (HCU) begann die Dokumentation der Moai 2007 in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI) in Bonn, als die ersten drei Moai-Stätten durch terrestrisches Laserscanning erfasst wurden. 2008 wurden weitere acht Moai-Stätten gescannt. Das langfristige Ziel des Projektes ist, die verbliebenen Moai zu dokumentieren und zu katalogisieren, um alle relevanten Daten in einem Geoinformationssystem (GIS) zusammenzufassen. Zusätzlich ist die Analyse möglicher Deformationen und die Überwachung geplanter Konservierungsmaßnahmen für ausgewählte Moai eine weitere Zielsetzung des Projektes. Die Aufnahme der Statuen durch terrestrisches Laserscanning, das Modellieren durch Dreiecksvermaschung und deren Texturierung mit hoch auflösenden Bildern werden in diesem Beitrag beschrieben. Außerdem wurden erste Tests einer Deformationsanalyse durch 3D-Vergleich ausgewählter Moai durchgeführt. Jedoch konnten bis jetzt keine signifikanten Änderungen für den kurzen Zeitabstand von einem Jahr ermittelt werden.

1 Introduction

One of the most unique – and remote – areas on Earth, Easter Island was named for the day Dutch Admiral Roggeveen first discovered the island in 1722. How the island initially became inhabited remains speculative; legend claims Polynesian King Hoto Matua and others sailed double-hulled canoes to begin occupying the island around 1000 AD. The island's huge volcanic rock statues – called Moai by the islanders – have also puzzled ethnographers, archaeologists and island visitors. On average standing 4 m (13 ft) high and weighing 14 tons, the Moai are believed to have been carved, transported and erected between 1400–1600 AD. Most archaeologists believe the Moai are standardized representations of powerful leaders on early Easter Island, or Rapa Nui, the name given to their land by islanders. Today, the German Archaeological Mission is seeking to help document and conserve these historical monuments. Using terrestrial laser scanning systems, the expedition team is helping preserve the past for the future – today.

A triangle of volcanic rock, Easter Island lies about 3,800 km (2,361 mi) west of Chile in the Southeast Pacific Ocean. A Chilean province, the 163 km² (63 mi²) island has more than 800 Moai remaining, yet most are in poor condition. The statues were almost all erected singly or in a few groups along the coast on stone platforms known as Ahu. The Moai and Ahu are increasingly at risk of damage by exposure to wind and weather or by vandalism; most of the statues have been toppled due to human activity or natural events – such as tsunamis – and lie face down on the ground. Since 1995, the Moai have been protected as UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) World Cultural Heritage monuments, but so far they were never documented via digital copies.

Risk of damage is one reason the German Archaeological Mission conducted four weeks of field studies on Rapa Nui in each of February 2007 and in February/March 2008. The expedition is a cooperative project between the German Archaeological Institute (DAI), Bonn; the Geomatics Department of Hafen-City University, Hamburg (HCU); and the Bavarian State Department of Monuments and

Sites, Munich. Work was closely coordinated with Chile's Consejo de Monumentos Nacionales, Santiago, and local island authorities. The project's objective is to further research the island's history, its inhabitants and the still largely unknown Moai. In addition, the DAI will document and catalogue the remaining Moai as well as assemble all relevant data into a Geographic Information System (GIS) (KERSTEN & LINDSTAEDT 2007, VOGT et al. 2007). Furthermore, the project will test whether deformations on the Moai can be clearly identified using the terrestrial laser scanning technology. Additionally, conservation processes could be monitored at specified time intervals by TLS.

As known from the literature a terrestrial laser scanning system was used for the first time on Easter Island, when amongst other the Moai at the Museo Antropologico P. Sebastian Englert and the petroglyphs at Orongo were scanned by a CYRAX 2500 in 2003 for the University of Hawaii, Department of Anthropology (WELLMAN 2003).

2 System Used for Object Recording

The scanning of the objects was performed with the following terrestrial laser scanning systems: Trimble GX (2007), Trimble GS101 and the IMAGER 5006 from Zoller & Fröhlich (2008). Additionally, some of the Moai (Vaihu, Huri A Urenga and Akapu) were documented by photographic image acquisition using a commercial digital SLR camera Nikon D40 (28mm lens).

The 3D terrestrial laser scanning systems GX and GS101 (cf. Fig. 1 left), which are manufactured by Mensi S.A., France for Trimble, consist of a laser scanner (weight 13.5 kg), accessories (consisting of a backpack and a notebook for controlling the unit during data acquisition) and appropriate software for data acquisition and post processing. The IMAGER 5006 (weight 14 kg) is produced by the German company Zoller + Fröhlich. This scanner can be used as a stand-alone system or with a notebook. The optimal scanning range is between 2 and 100 m for the GS101 (with the option OverScan up to 150 m), and up to 200 m

Tab. 1: Summary of technical specifications of the laser scanning systems used.

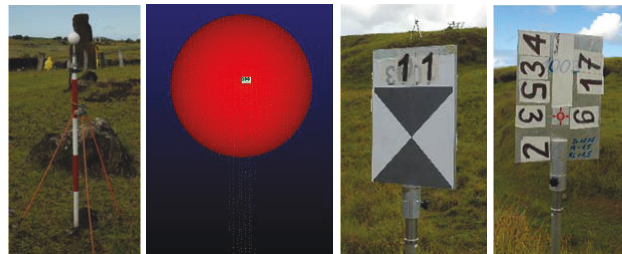
Scanner / Criterion	Trimble GX	Trimble GS101	Z+F IMAGER 5006
Scan method	Time-of-flight		Phase shift
Field of view [°]	360 × 60		360 × 310
Scan distance [m]	< 200 (<350)	< 100 (<150)	< 79
Scanning speed	≤ 5000pts/s		≤ 500000pts/s
Angular resolution [°]	0,0017		0,0018
3D scan precision	12mm/100m		2.5-7.5mm/50m ¹
Camera	integrated		add-on option
Inclination sensor	yes	no	yes

¹ range noise depending on object colour**Fig. 1:** Terrestrial laser scanner Trimble GX (used in 2007), Trimble GS101, IMAGER 5006 from Zoller & Fröhlich (both used in 2008).

for the GX (with the option OverScan up to 350 m), while the IMAGER 5006 (cf. Fig. 1 right) is only able to scan up to 79 m. All scanners used are panoramic view scanners (field of view 360° horizontal, 60° vertically for GX/GS101, and 360° × 310° for the IMAGER 5006). The laser beam has a diameter of 3 mm at 50 m distance (GX/GS101) and 14 mm at 50 m distance for the IMAGER 5006, whereby the 3D scan precision is 12 mm at 100 m dis-

tance (GX/GS101), and 10 mm at 50 m distance (IMAGER 5006). The distance measurements are performed by pulsed time-of-flight laser ranging using a green laser (532 nm, laser class II or III) for both Trimble scanners, while the IMAGER 5006 is a phase-shift scanner with a red laser. The GX/GS101 is able to measure up to 5000 points per second, but in the practical use on Easter Island the scanner was not able to scan more than 1000 points per second. In contrast to this slow scanning speed the IMAGER 5006 offers high speed scanning with up to 500,000 points per second.

The technical specifications and the important features of the three used laser scanners are summarised in Tab. 1. The three scanners represent two different principles of distance measurement: Z+F IMAGER 5006 uses phase shift method, while Trimble GS101/GX scans with the time-of-flight method. In general it can be stated that the phase shift method is

**Fig. 2:** From left to right: Marked point with white sphere for registration and geo-referencing of scans from GX/GS101, scanned and recognised sphere for GS101, front side of the target for IMAGER 5006 and back side of the same target for geodetic point determination and a flexible numbering system.

fast but signal to noise ratio depends on distance range and lighting conditions. If one compares scan distance and scanning speed in Tab. 1, it can be clearly seen, that the scanners using the time-of-flight method measure longer distances but are relatively slow compared to the phase shift scanner. For the GS101/GX power supply the Honda power generator was necessary, while for the IMAGER 5006 two internal batteries were available, which offers high flexibility for scanning in the field for approx. 4 hours.

For all of the scanned objects spheres (GX/GS101) or targets (IMAGER 5006) were used for registration and geo-referencing of the scans from different scan stations (cf. Fig. 2). The diameters of the spheres used were 76.2 mm. To obtain centre positions of the spheres and targets, the point clouds representing the sphere were automatically fitted using algorithms of the Trimble software PointScape or RealWorks Survey, while for the determination of the target centre the software LaserControl from Zoller + Fröhlich was used.

3 The Scanned Objects – Moai of Easter Island

The Moai are monolithic statues carved from rock on Rapa Nui (Easter Island). Nearly half

(397) of the 887 Moai are still around the main Moai quarry (Rano Raraku), but 288 were transported from there and set on Ahu (platforms) which were mostly close to the sea at the island's perimeter. 92 Moai are on a route to an Ahu. Almost all have overly large heads three fifths the size of their body. The Moai are the 'living faces' and representations of chiefly, deified ancestors, sitting on their Ahu with their backs to the sea. Nowadays, most are toppled due to earlier tsunamis, earthquakes and conflicts between different clans on the island. The tallest Moai erected was almost 10 metres (33 ft) high and weighed 75 tonnes; the heaviest erected was a shorter but squatter Moai at Ahu Tongariki which weighed 86 tons; while one unfinished sculpture, which is still in the quarry at Rano Raraku, would have been approximately 21 metres (69 ft) tall with a weight of about 270 tons.

The distribution of Moai on Easter Island, which were scanned in 2007 and 2008 by the Department Geomatics from the HafenCity University Hamburg, is illustrated in Fig. 3. The Moai at Vaipuu, at Hanga Mea, and at Akahanga are toppled, while all other scanned Moai stand erect.

In total, eleven object sites were scanned in the two field campaigns 2007 and 2008, whereby three Moai sites (Akivi, Ko Te Riku, and Vaihu) were scanned in both years for deformation analysis of statues. The list of Moai



Fig. 3: Distribution of Moai on Easter Island, which were scanned in 2007 and 2008, illustrated in Google Earth.

Tab. 2: List of Moai scanned in 2007.

Object	Scanner	Date	Scan time
Vaihu Moai	GX	07.02.2007	½ day
Ahu Akivi	GX	09.–10., 12.–14.02.07	3 ½ days
Ahu Ko Te Riku	GX	13./20.02.2007	2 days

Tab. 3: List of Moai scanned in 2008.

Object	S	Date	Scan time
Vaihu Moai	a	19.02.2008	½ day
Huri A Urenga	b	19.02.2008	½ day
Tongariki	a, b	20.02.2008	1 day
Ahu Akivi	a	21.–22.02.2008	2 days
Ahu Nau Nau	b	25.–26.02.2008	2 days
Ahu Ature Huki	a	26.02.2008	½ day
Ahu Akahanga	b	28.02./02.–03.03.2008	3 days
Hanga Kio'e	a	28.02.2008	1 day
Represa Vaipu	a, b	29.02./04.03.2008	2 days
Hanga Mea	a	03.03.2008	1 day
Tahai, Ko Te Riku	a	04.03.2008	1 day
S = Scanner, a = GS101, b = IMAGER 5006			

scanned in 2007 is summarised in Tab. 2, while the scanned Moai in 2008 are listed in Tab. 3.

4 Object Recording

Prior to this project, the only available documentation of the Moai had been in the form of pictures and drawings, combined with sketches of a few selected figures. To perform a comprehensive analysis of weathering and erosion for all the Moai, the three above-mentioned scanners were used to record the objects. The choice of a non-contact measurement method was very important as walking on the Ahu or touching the Moai is not permitted. As the local surroundings of some Moai were also to be scanned, it was necessary to use a scanner that had a wide range as well as high measurement precision. The goal was to produce exact 3D models of three selected Moai (Akivi, Ko Te Riku, and Vaihu) to record the deterioration

process within millimetre accuracy by follow-up scanning on an annual basis. The focus of this paper is on these three Moai, which were scanned with Trimble scanners. The data of all other sites scanned with IMAGER 5006 is still in the processing phase.

Using the Trimble scanners the 3D geometry of the different Ahu and Moai could be scanned and the intensity values of the laser beam and the RGB values of the internal video camera were also stored for each 3D point. Firstly, the initialization of the scanner and the definition of the relevant scanning station were performed using the scanning program Point-Scape V3.1. After scanner initialization the scanning area was specified in real time via the displayed video frame from the scanner's internal camera. This process is particularly recommended, in order to avoid unnecessary data volumes from the environmental area of the sites and to optimize scanning time. To ensure complete object scanning different scanner stations around the object were needed.



Fig. 4: Moai on Easter Island, which were scanned in 2007 and 2008 for deformation analysis: Vaihu (top), Akivi (centre), and Ko Te Riku (bottom).



Fig. 5: Representation of point cloud with intensity values, which were scanned from one scanner station at Ahu Nau Nau with the terrestrial laser scanning system Z+F IMAGER 5006.

Furthermore, spheres (cf. Fig. 2 left) were placed on all marked points in the field for use in registration and geo-referencing and these were scanned from each scanner station. The scanned spheres could be automatically recognised in the point cloud by the software (cf. Fig. 2). In total approximately one hour scanning was required for each scan station.

The scanning strategy using the Z+F IMAGER 5006 was different to the scanning with the GX/GS101. Due to the huge data volume of each scan it was more appropriate to use targets for direct geo-referencing of each scan (cf. Fig. 2 right). Therefore, at least three, but in the most cases four, well-distributed targets were included in each scan. The coordinates of the targets were determined simul-

taneously by a total station using a special red target on the back side of the laser scanning target (cf. also Fig. 2 right), while the scanner position could be determined by measuring an eccentric 360° prism on top of the scanner. All targets are determined by polars in a local geodetic network, which will later be transformed to the network of the island using GPS measurements. The precision of the direct geo-referencing is in the range of 1 to 5 millimetres. The parameter for scan resolution was set to high or super high with low noise depending on the distance to the object. In total 25 minutes were used for each scan station. This included the geodetic measurements of the total station and the move to the next station. Direct geo-referencing was performed in 10 minutes per station in the post processing phase. In summary, 112 scan stations were used to scan the objects listed in Tab. 3, which yielded 31.3 GB of data and 1.8 GB of digital images using the add-on camera Nikon D40. The digital images could be used in a post processing procedure to integrate the imagery as RGB values into the point cloud. Fig. 5 illustrates a scan of the IMAGER 5006 representing some Moai of Ahu Nau Nau. The data evaluation of IMAGER 5006 scans is planned for 2009.

4.1 *Vaihu*

The single Moai at Vaihu (cf. Fig. 4 top) was the first statue scanned in 2007 and in 2008 using the Trimble scanners. Just four scanner positions were necessary for scanning the Moai each year, using four spheres for registration and three of them for geo-referencing. For geo-referencing three points were marked with wooden sticks sunk into the ground and measured by GPS. The same points were available for both 2007 and 2008. In total 2.3 million points were scanned with a grid density of 7 mm each year.

4.2 *Ahu Akivi*

The stone figures of Ahu Akivi (cf. Fig. 4 centre) were scanned in 2007 and in 2008 using the Trimble scanners. This group of seven

Moai, about 4.5 m (15 ft) tall, is one of the few statues looking out to the ocean; most statues face inland. The group was restored and set upright again in 1960 a few kilometres inland from the coast. The figures symbolize the seven scouts, which according to legend were sent across the ocean by Polynesian chief Hotu Matua to locate Rapa Nui.

To fully document the Moai (with a scanning grid size of 5–20 mm at 10 m distance) and surroundings, a total of 9.5 million points were recorded from twelve scanner stations in 2007. The Ahu, the remains of two cremation chambers behind the Moai, and the open space in front of the statues were also scanned. Eleven control points (spheres) around the object were marked and determined by differential GPS (DGPS), so an identical coordinate system could be recreated for the subsequent scans in 2008. In 2008 only the Ahu and the seven Moai were scanned with grid size of 20 mm at 50 m distance from six scanner stations (3.7 million points) using four of the marked control points. The Moai are illustrated in different states (as point cloud with RGB values of the internal video camera, as point cloud with intensity values, and as meshed 3D model) in Fig. 6.

4.3 *Ko Te Riku*

The third object scanned was the single Moai Ko Te Riku at the Tahai Ceremonial Complex, located on the coast in Hanga Roa, the island's only settlement. Due to its head covering (Pukao) of reddish volcanic rock, this Moai could not be completely surveyed using the four scanner positions on the ground. Due to a crash of the laser scanning system Trimble GX on February 20th 2007, which could not be repaired on the island, the scanning of Ahu Ko Te Riku could not be completed, i.e. ca. 20% of the Moai was not scanned. Therefore, only 730,000 points were available for the Moai, which was scanned with grid size of 5–7 mm at 10 m distance for the back of the statue.

In 2008 the Moai and its Ahu were scanned from six scanner stations (grid size 10 mm at 30 m distance, 1.2 million points) using nine spheres on marked control points, which were

well-distributed around the object, for registration and geo-referencing.

4.4 GPS Measurements

For the geo-referencing of the laser scanning data and for the geodetic documentation of all excavation sites in the island's coordinate system SIRGAS (FORTES et al. 2006, GONZÁLEZ 2007) at least three points were marked in the field per object site. All marked points were determined by differential GPS measurements (interval 15 seconds) using two Ashtech Pro-Mark2 instruments simultaneously, one as a reference station on a reference point of the coordinate system SIRGAS and one as a rover on marked points. Therefore, the coordinates have been determined by post processing using additional GPS data from the local permanent GPS station ISPA. For the transformation of the GPS measurements into the island's coordinate system SIRGAS the six reference points were measured. The determination of the WGS84 coordinates of all points from 2007 yielded a standard deviation in $s_{xy} = 5$ mm (max. 18.5 mm) and $s_z = 10$ mm (max. 29.1 mm), while for the transformation into the UTM coordinate system of the island a precision for $s_{xy} = 10$ mm and for $s_z = 50$ mm was achieved.

5 Data Processing and Modelling

5.1 Registration and Geo-referencing of Scans

The automatic sphere-based registration of the three-dimensional point clouds of each laser scanner station for the GX/GS101 was accomplished with the software RealWorks Survey 5.1 (RWS). The number of scanner stations, number of marked points used, number of points per point cloud per object and the precision of the registration and geo-referencing are summarized in Tab. 4.

Only three spheres were available for geo-referencing of Ko Te Riku (cf. Tab. 4), while for all other sites all spheres could be used for geo-referencing. For the IMAGER 5006 scan data the direct geo-referencing was tested exemplarily for some scans in the local geodetic network to see the precision potential, which was in the range of 1 to 5 millimetres as mentioned before. It was decided to perform the direct geo-referencing of all IMAGER 5006 scans only when the GPS data have been processed and all absolute coordinates of all targets are available.

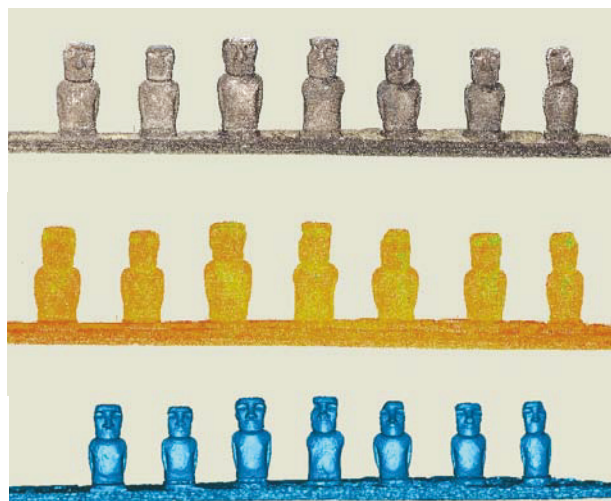


Fig. 6: Ahu Akivi represented as point cloud with RGB values of the internal video camera, as point cloud with intensity values, and as meshed 3D model.

Tab. 4: Precision of registration & geo-referencing for three objects scanned in 2007 with GX and in 2008 with GS101.

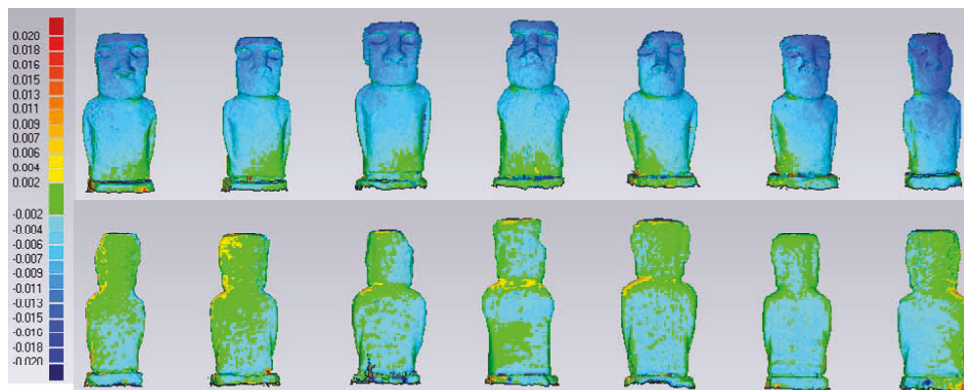
Site	System	# station/ spheres	# points [mio.]	Precis. registr. [mm]	Precis. geo-ref. [mm]
Vaihu	GX	4 / 4	2,3	2	6.8
Akivi	GX	12 / 9	8,9	5	8.3
KoTeRiku	GX	4 / 6 (3)	0,7	5	6.5
Vaihu	GS101	4 / 4	2,3	3	12.2
Akivi	GS101	6 / 4	3,7	6	21.0
KoTeRiku	GS101	6 / 9 (3)	1,2	9	9.0

5.2 Modelling of the Point Clouds

After registering and geo-referencing the scans the entire point cloud of each object will be segmented in RealWorks Survey 5.1, i.e. all points, which do not belong to the object or which are not necessary, will be deleted. Thus, the point cloud can be slightly reduced. Another option to reduce the point cloud is resampling into regular point grid spacing. The point clouds were exported in an ASCII format, in order to transfer the data to the modelling software Geomagic 10. Here, the point clouds were additionally resampled by decreasing the grid spacing, e.g., 20 mm, which offers faster visualisation performance on a standard notebook. The quality of the point cloud can be improved by filtering and following elimination of blunders, which could cause

a further reduction of 10% for the point cloud. Finally, a triangulation (meshing) of the point cloud results in 3D models of the Moai, which are shown in Fig. 7. These models (cf. Fig. 6 bottom) can now be used for further investigations such as volume calculations, cutting slices, etc. and also for visualisation tasks using texture mapping as shown in Fig. 10. Furthermore, these models are the basic data set for deformation analysis, thus it is possible to analyse the changes on the Moai between 2007 and 2008, caused by erosion, weather or other climatic aspects.

Additionally, scanning the surrounding area enables both a site plan and a terrain model to be generated, providing the archaeologists with important base-line data for later excavation work.

**Fig. 7:** Front and back view of the Moai at Ahu Akivi illustrating the differences between two 3D models from 2007 and 2008.

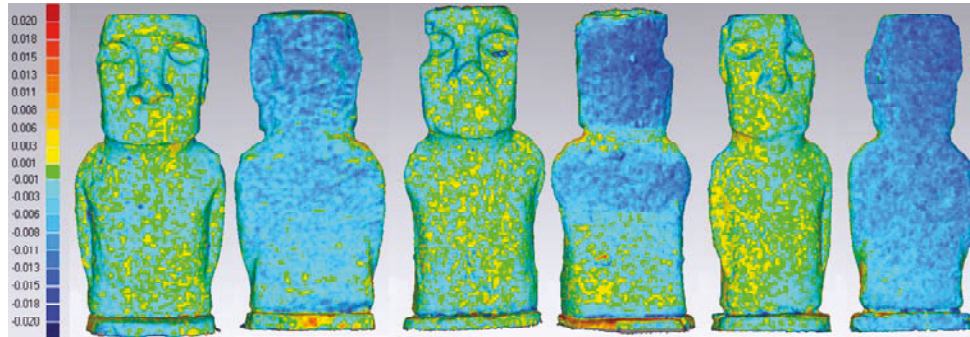


Fig. 8: Front and back view of three Moai (left, centre, right) at Ahu Akivi illustrating the differences between two 3D models from 2007 and 2008 (after separate model-to-model registration for each Moai).

5.3 Deformation Analysis

To analyse changes and deformation of the Moai within a specified time interval a 3D comparison of the two triangulated meshes of both epochs using Geomagic is required. The 3D model-to-model registration was computed based on the ICP algorithm (iterative closest point) using just the 3D models of each epoch and not any GPS data for the geo-referencing. Therefore, the figures were modelled using a high-resolution point cloud with a point grid of 5mm for the Moai at Vaihu and 2mm for Ahu Akivi. This 3D comparison could allow signs of existing erosion to be clearly identi-

fied or changes from conservation to be explicitly monitored; more significantly, it will enable future scanning at set time intervals to quantify possible erosion processes and show the progress of conservation measures applied to statues.

Currently, it is difficult to specify the range of expected changes/deformations on the Moai, but it could be a change of some millimetres in a ten year period. Changes or deformations can be caused by erosion or weather conditions, which could leave traces on the whole bodies of the statues. On the other hand unstable ground from the renovation of the platform could cause slightly increasing incli-

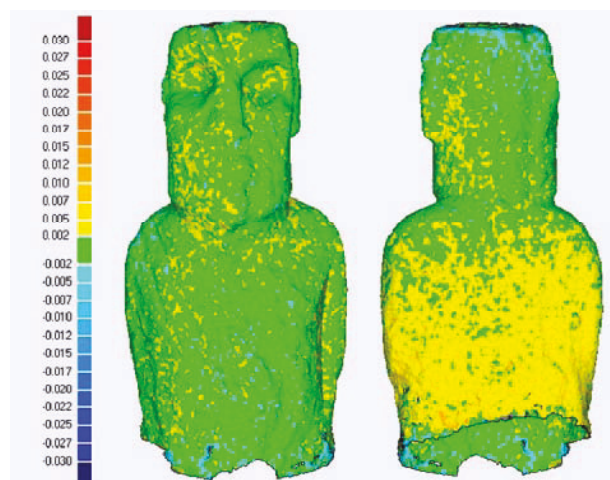


Fig. 9: Presentation of differences (± 2 mm in average) between two 3D models of the Moai at Vaihu (2007–2008).

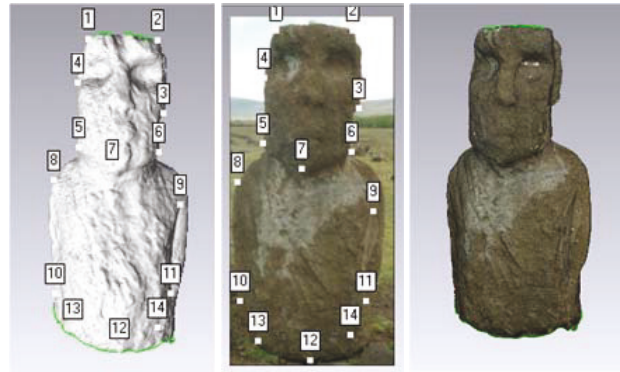


Fig. 10: Texture mapping of the front part of the Moai at Vaihu using the software Geomagic Studio 10.

nation or/and a vertical shift of the erect Moai, which could only be detected if the two temporally different 3D models could be compared in the same fixed coordinate system. Therefore, a precise geodetic network is required, although it has not yet been established. Fig. 7, 8, and 9 represent the model-to-model differences between 2007 and 2008 for Ahu Akivi and the Moai at Vaihu. The deviation was 5 mm on average for all models, which is the absolute value of the precision of the systems. Due to slight systematic effects, which can be seen in Fig. 7, an additional model-to-model registration was carried out for three individual Moai (left, centre and right statue). Fig. 8 illustrates the results of the 3D comparison for the three Moai as front and back view. It is obvious, that the back part of the Moai could be slightly eroded, but this effect is still within the precision of the systems. These deviations are influenced by the precision of the laser scanning systems, by errors from the registration, and possibly by blunders from the 3D modelling in Geomagic. Currently it is difficult to explicitly address an error source to a specific effect. To prove significant changes in the statues more investigations are required.

5.4 Texture Mapping

The texture mapping of the Moai using high resolution imagery could be applied with two different methods: (i) by registration of the photo and the meshed 3D model via measured

control points (cf. Fig. 10 left) or (ii) by automatic texturing using the orientation parameters of each photo, which are in the same coordinate systems as the scanned point cloud, and its related camera calibration parameters (ABDELHAFIZ & NIEMEIER 2006).

First tests for texture mapping were carried out using the software Geomagic 10. Therefore, a triangulated mesh of the point cloud was created and the Moai was textured by registration of high-resolution images from the Nikon D40 and the meshed 3D model (cf. Fig. 10). The results were not satisfactory due to unexpected white patterns on the textured model (see right eye of the Moai in Fig. 10 right) and due to smearing effects in the overlapping area of photos, which might be caused by bad registration. Therefore, further different software packages, e.g., QTSculptor from Polygon Technologies, will be tested to generate textured 3D models of the Moai.

6 Conclusions and Outlook

Terrestrial laser scanning offers an efficient technique for the documentation of Easter Island's cultural heritage – the Ahu and Moai. In the past the statues were mainly toppled by natural disasters like earth quakes and tsunamis, today's disasters are ignorant tourists, who do not respect the cultural heritage and even destroy the Moai by vandalism, as it happened in March 2008, when a Finnish tourist damaged one statue of Ahu Nau Nau. This demonstrates clearly that it is absolutely es-

sential to scan the Moai for documentation and to generate 3D models as a digital copy of the Moai from scanned point clouds. In 2007 and 2008 eleven object sites (Ahu and Moai) were scanned with Trimble and Z+F scanner, whereby three objects were scanned in both years for testing deformation analysis by 3D comparison. As expected no significant changes on the Moai could be detected within the short time interval of one year. Nevertheless, the same Moai will be scanned in the next years to document possible deformations and to estimate its possible deformation range. Nevertheless, the scanning of the top of a Moai is not possible due to the height of the statues compared to the low scanner stations.

During the scanning project the importance of proper preparation for local weather conditions became clear. Hot temperatures – 27–33° C or 81–91° F – caused scanner operating temperatures of more than 40° C (104° F) at times. The scanner worked absolute perfectly the entire time in 2008, but the island's heat, wind and sudden showers added to the project's challenge. Due to a close position of most platforms to the sea the scanner also needed to be positioned close to the ocean when scanning the back of the Ahu/Moai. Here, the salty humidity trickling off the glass plate of the scanner caused problems (no returned signals) for the Trimble scanners during scanning.

The generation of 3D models for the scanned Moai is still in progress. Here, the challenge is to model the Moai with geometrical correctness although the data volume needed to be reduced to an accepted minimum while the meshed models should be visualised interactively with high resolution photo-realistic texture mapping. However, some software packages will be tested for texture mapping of the models of the Moai.

Finally, the scanning of all erect Moai outside the quarry in Rano Raraku could be finished during the next German expedition in 2009. The scanning and documentation of all 887 Moai might take some more years.

References

- ABDELHAFIZ, A. & NIEMEIER, W., 2006: Developed technique for automatic cloud texturing using multi images applied to a complex site. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (5): 1–7.
- FORTES, L.P., LAURÍA, E., BRUNINI, C., AMAYA, W., SANCHEZ, L., DREWES, H. & SEEMÜLLER, W., 2006: Current Status and Future Developments of the SIRGAS Project. – *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover* **258**: 59–70.
- GONZÁLEZ, V.F.H., 2007: Geomatics Technologies Applied for Land Use on Easter Island (Chile). – *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería* **15** (2): 193–198.
- KERSTEN, TH. & LINDSTAEDT, M., 2007: Scanning Easter Island's Moai. – *Technology & More, Trimble Engineering & Construction* **2007** (3): 12–14.
- WELLMAN, D., 2003: Archaeological 3D Laser-scanning in the South Pacific. Rapa Nui: Easter Island. – *GIM International* **17** (8): 40–43.
- VOGT, B., KERSTEN, TH., LINDSTAEDT, M., FASSBINDER, J. & MOSER, J., 2007: Terrestrial Laser Scanning and Geophysical Prospection of Selected Ahu and Moai – The First Field Season of the German Archaeological Mission to Rapa Nui in 2007. – *VII International Conference on Easter Island and the Pacific - Migration, Identity and Cultural Heritage*, Gotland University, Sweden.

Addresses of the Authors:

THOMAS P. KERSTEN & MAREN LINDSTAEDT, HafenCity University Hamburg, Department Geomatics, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5343, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: {Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt}@hcu-hamburg.de

BURKHARD VOGT, German Archaeological Institute, Commission for the Archaeology of Extra-European Cultures, Dürenstraße 35-37, D-53173 Bonn, Tel.: +49-1888-7712-12, Fax: +49-1888-7712-49, e-mail: vogt@kaak.dainst.de

Manuskript eingereicht: Juni 2008

Angenommen: November 2008

4. Objektmodellierung auf Basis kinematischer Scans

Im Kapitel 4 wird der kummulative Teil der Dissertation mit zwei weiteren Fachartikeln über die „Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning“ (Kap. 4.1) und über die „Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser“ (Kap. 4.2) fortgesetzt, die sich mit dem Themen über das landbasierte und wasserbasierte kinematische Scanning beschäftigen.

4.1. Landbasiertes kinematisches Scanning

Kapitel 4.1 veröffentlicht in The Photogrammetric Record, Vol. 24, Ausgabe 126 (ISSN 1477-9730) als:

Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning

Autoren: Thomas P. Kersten^a, Gürcan Büyüksalih^b, Ibrahim Baz^b, Karsten Jacobsen^c

^a HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

^b BİMTAŞ, Istanbul, Türkei

^c Leibniz Universität Hannover

Publikationsverlauf: eingereicht Juni 2008, akzeptiert November 2008, publiziert Juni 2009

Vollständige Referenz: Kersten, Th., Büyüksalih, G., Baz, I., Jacobsen, K., 2009. Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning. The Photogrammetric Record, 24(126): 122-138. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2009.00528.x

Internet link: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-9730.2009.00528.x/abstract>
https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Kersten/publication/240608982_Documentation_of_Istanbul_Historic_Peninsula_by_Kinematic_Terrestrial_Laser_Scanning/links/54294dc70cf26120b7b5b6ec.pdf

Project Report

DOCUMENTATION OF ISTANBUL HISTORIC PENINSULA BY KINEMATIC TERRESTRIAL LASER SCANNING

THOMAS P. KERSTEN (Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de)
HafenCity Universität Hamburg, Germany

GÜRCAN BÜYÜKSALİH (gbuyuksalih@yahoo.com)

İBRAHİM BAZ (ibaz@bimtas.com.tr)
BİMTAŞ, Altunizade-Istanbul, Turkey

KARSTEN JACOBSEN (jacobsen@ipi.uni-hannover.de)
Leibniz Universität Hannover, Germany

Abstract

Although the Historic Peninsula of old Istanbul was added to the UNESCO World Heritage List in 1985, complete documentation of this important area has not yet been carried out. In 2006 the Istanbul Metropolitan Municipality's Historical Environment Protection Directorate initiated the "Historic Peninsula Project", which covers an area of 1500 ha and includes approximately 48 000 buildings in crowded and frequently narrow streets. BİMTAŞ, a company owned by the Municipality, immediately started the documentation of all buildings in the project area using terrestrial laser scanning. This created the challenge of building up an efficient production environment with new high-end technology to fulfil the requirements of this project in a very short timeframe of 2 years. This paper describes the entire production environment for documentation of all buildings, detailing the frequent adaptations of the process resulting from learning on the job. Although the data acquisition and mapping environment was established in the course of production, it was always essential to optimise the technical solutions in order to meet the requirements for data quality and delivery deadlines. Only 80 ha of the required 1500 ha was completed using static scanning during the first 6 months, thus requiring a change from static to mobile terrestrial laser scanning in order to accelerate the work and to conclude the scanning phase for the remaining major area within 3 months.

KEYWORDS: buildings database, cultural heritage, mobile survey methods,
spatial data acquisition, terrestrial laser scanning

INTRODUCTION

THE HISTORIC PENINSULA of old Istanbul (Fig. 1) is one of the most important tourist locations in Turkey. Because of their international importance, these "Historic Areas of Istanbul" were added to the UNESCO World Heritage List in 1985. This area is located on the southern shore



FIG. 1. Area of the “Historic Peninsula Project” in Istanbul.

of the Golden Horn, which separates the old city centre from the northern and newer parts of the European side of Greater Istanbul. The Historic Peninsula ends with the Theodosian Land Walls in the west. The peninsula is surrounded by the Sea of Marmara on the south and the Bosphorus on the east.

The documentation of the Historic Peninsula is a challenge because of the urban topography and the daily street life. Several disciplines including urban planning, architecture, telecommunications, tourism, environmental protection and many others have an increasing demand for a digital 3D city model of Istanbul. Consequently, this model will be used in planning, analysis, visualisation and simulation in different applications, including 3D urban conservation and implementation plans, and detailed studies of urban design. Additionally, open access geospatial viewers such as Google Earth and Microsoft Virtual Earth have increased this demand for a 3D city model. Nevertheless, it has not yet been decided whether and how such data will be available for these public viewers. To satisfy the high demand for such data, city models must be acquired quickly, precisely, completely and in detail, and in an economically efficient manner. For city modelling applications, mobile mapping systems have significant benefits thanks to their speed and mobility. Hence, traffic management is not required and large areas can be surveyed rapidly.

Schwarz and El-Sheimy (2004) and El-Sheimy (2005) give an overview of mobile mapping technologies and systems focusing on sensors and algorithms. Frueh and Zakhor (2003) presented a fast approach to automated generation of textured 3D city models with both fine detail at ground level and complete coverage for a bird’s-eye view; their building façades were acquired at ground level by driving a vehicle equipped with two SICK LMS 2D laser scanners and a digital colour camera with a wide-angle lens under normal traffic conditions on

public roads in the USA, while a digital surface model (DSM), containing complementary roofs and terrain shape, was created from airborne laser scans. The integration of a terrestrial laser scanner (Riegl Z-210) with global positioning system/inertial measurement unit (GPS/IMU) orientation sensors on the Geomobil mobile mapping system developed at the Institut Cartogràfic de Catalunya in Barcelona is presented by Talaya et al. (2004). The dynamic laser survey showed rms differences of 18 cm in Easting, 35 cm in Northing and 13 cm in the vertical component when compared to 1:1000 city maps as references. Hunter et al. (2006) and Kremer and Hunter (2007) introduced the StreetMapper mobile laser scanning system, which has been operating in the UK since 2005. This system uses Riegl 2D laser scanners integrated with an IGI TERRAControl GPS/INS system for data acquisition on projects which have included highway asset measurements, indivisible abnormal load route planning and 3D city modelling. Also, StreetMapper provides detailed data for the façades of buildings and high resolution measurements of power lines adjacent to streets. Barber et al. (2008) report on the geometric validation of the StreetMapper system by assessing the precision and accuracy of data collected across two test sites (a peri-urban residential housing estate with low density housing and wide streets, and a former industrial area consisting of narrow streets and tall warehouses). The accuracy investigations resulted in an rms error in elevation in the order of 3 cm, while a planimetric accuracy of approximately 10 cm was achieved. This demonstrates the performance potential of a mobile mapping system using kinematic terrestrial laser scanning with integrated GPS/INS. Another investigation into quality management in kinematic laser scanning (Gräfe, 2007) showed that an accuracy of 3 to 4 mm can be achieved with the laser scanner data of the Mobile Road Mapping System (MoSES), developed at the German Armed Forces University in Munich, even with a combination of different scanners; additionally, stereo-photogrammetric measurements fit to the laser scanner data of this system within their measurement accuracy of below 5 cm. Gandolfi et al. (2008) introduce the Road-Scanner system, which is equipped with two GPS/IMU sensors (Applanix POS LV) for navigation, four cameras for close range photogrammetric survey and a FARO LS880 terrestrial laser scanner, for mapping of high density urban areas of Bologna (Italy). To check the accuracy of the results obtained by this mobile mapping system, independent reference data was measured mainly by the GPS–real-time kinematic (RTK) technique in four test areas. The mean rms values were 10 cm in Easting and Northing, and 5 to 6 cm in the vertical component.

The objective of this paper is to describe the documentation of the Istanbul Historic Peninsula by data acquisition with static and kinematic (mobile) terrestrial laser scanning for the building façades and aerial imagery for the roofs. The documentation of such a large and challenging area using sensor and data fusion had not, to the authors' knowledge, been published prior to the contribution concerning this project by Buhur et al. (2008) and that by Baz et al. (2008) from which the present paper has been developed. The project demonstrated that a significant acceleration of data acquisition by kinematic laser scanning was the key for a successful project. Furthermore, the workflow for the façade and roof mapping and 3D modelling are presented including the fusion of building façades generated from terrestrial laser scanning data and roofs derived from aerial images. Additionally, some timing aspects for controlling the workflow of such a huge project are mentioned.

THE ISTANBUL HISTORIC PENINSULA PROJECT

The area of Istanbul bounded by the inner city wall and known as the Historic Peninsula consists mostly of protected urban areas of great historical and archaeological interest. The

Historic Peninsula Project (Fig. 1) covers an area of 1500 ha and includes approximately 48 000 buildings in crowded and frequently narrow streets with a total length of some 400 km. The façades of the buildings along the roads and streets cover an area of about 5.5 million m². In 2003, the whole area was declared as a protected area (İstanbul Büyükşehir Belediyesi Planlama İmar Müdürlüğü, 2003), when urban protection plans at 1:5000 and 1:1000 map scales were completed. The districts Eminönü and Fatih were added after the localities of Süleymaniye, Zeyrek, Cankurtaran, as well as the *hans* (caravanserais) and city walls areas of the Peninsula, were also declared as protected (World Heritage Committee, 2006). In these urban protection plans, first, second and third degree protection areas were defined. For the first and second degree protection areas, detailed studies of urban design projects based on 1:500 and 1:200 map scales will be carried out in the future. In the meantime, all zoning applications in this area were suspended until the urban design project had been completed.

A project contract, briefly named “Historic Peninsula Project”, was awarded by the Istanbul Metropolitan Municipality’s Historical Environment Protection Directorate to BİMTAŞ, a company owned by the Municipality. The project comprises the following phases:

- (1) Research studies and analysis are to be carried out to determine historical, socio-logical, economic, urban and architectural factors of the region and logical relations between them.
- (2) Photographic and geometric determination of existing spatial features, physical factors and functional characteristics related to the cultural assets by analytical studies and technical drawings.
- (3) Introduction of former cultural assets through historical research and restoration works.
- (4) Development of proposals for restoration methods, urban design and new building designs compatible with the historical environment, in accordance with a synthesis based on the analysis of existing and historical cultural assets.

Finally, because of the requirement for many municipality applications and the likelihood of an earthquake in the Istanbul area within the next 30 years, BİMTAŞ started the documentation of all buildings in the area of the Historic Peninsula using terrestrial laser scanning in 2006. Under this highly ambitious project it was planned that the Historic Peninsula would be mapped within 2 years.



FIG. 2. Terrestrial laser scanners used: Leica HDS4500; Leica HDS3000; Optech ILRIS-3D; target for registration and georeferencing of scans.

TABLE I. Major technical specifications (according to system manufacturers) of the terrestrial laser scanning systems used.

	<i>Leica HDS4500</i>	<i>Leica HDS3000</i>	<i>Optech ILRIS-3D</i>
Scan method	Phase-based	Pulsed	Pulsed
Field of view [°]	360 × 310	360 × 270	40 × 40
Scan distance	<53.5 m	<100 m	<1500 m
Scanning speed	≤500 000 points/s	≤1800 points/s	≤2500 points/s
Angular resolution V/H	0.018°	0.0034°	0.001°
3D scan precision	5 mm/50 m	6 mm/50 m	8 mm/100 m
Camera	Add-on	Integrated	Integrated

SYSTEMS USED FOR DATA ACQUISITION

For this project a new production organisation was built up at BİMTAŞ, using modern 3D mapping and computer technology. The terrestrial laser scanning group includes 24 staff members using the following technical equipment for data acquisition: five Leica scanners (four HDS4500 and one HDS3000), four ILRIS-3D scanners from Optech (Fig. 2), four Topcon total stations for geodetic control point measurements and pre-calibrated Nikon D70 SLR cameras with 14 and 28 mm lenses for digital photogrammetric documentation. The technical specifications of the terrestrial laser scanning systems used for this project are summarised in Table I.

These three types of scanner use two different principles of distance measurement: the Leica HDS4500 uses the phase-shift method, while Leica HDS3000 and ILRIS-3D use the time-of-flight method. In general it can be stated that the phase-shift method is fast but the signal-to-noise ratio depends on the range (scan distance) and the lighting conditions. If scan distance and scanning speed shown in Table I are compared, it is obvious that the scanner using the time-of-flight method can measure over longer distances but is relatively slow compared to the phase-shift scanner.

The HDS4500 measures distances up to 53 m, while the HDS3000 and the ILRIS can measure up to 100 and 1500 m, respectively. Because of the limited speed of 1800 or 2500 points per second and the limited field of view it quickly became clear that the ILRIS scanners and the HDS3000 are not useful for the busy and narrow streets of the project area. These scanners are more suitable for the documentation of landmarks. Thus, all buildings were measured with a scan resolution of ~15 mm at the object using the four HDS4500 scanners. For data processing of the scanned point clouds, which includes registration, georeferencing and segmentation of the point clouds, five licences of Cyclone 5.2 and four licences of Polyworks 4.1 were used in the office.

For the scanning of the buildings, targets were used as control points for registration and georeferencing of the scans from different scan stations as illustrated in Fig. 2 (right). The targets consisted of black-and-white quartered discs with diameter 126 mm. To obtain centre positions of the targets, the targets were automatically fitted in the point cloud after manual pre-positioning using algorithms of the Leica Cyclone software.

DATA ACQUISITION BY TERRESTRIAL LASER SCANNING AND PHOTOGRAMMETRY

Static Terrestrial Laser Scanning

The data acquisition by static terrestrial laser scanning started in September 2006. It was soon found that in the special environment of the Historic Peninsula streets only the HDS4500 was able to function adequately. Furthermore, the registration of the point clouds of the ILRIS-3D caused problems with tilted scans from the same scan stations, requiring matching with the



FIG. 3. Example of a coloured point cloud of building façades on the Historic Peninsula.

Iterative Closest Point (ICP) algorithm and needing initial values for its computation. Consequently, the daily laser scanning was carried out with four, or sometimes with three, HDS4500 instruments. Fig. 3 shows an example of a coloured point cloud of building façades on the Historic Peninsula.

In general, a satisfactory spatial (geometrical) distribution of the targets on the object or around the object was guaranteed for the required description of the detailed object. The coordinates of all targets were determined by geodetic methods using total stations. The target-based registration and georeferencing of the point clouds captured by the HDS4500 scanners worked without any problems using the Cyclone software. The following method was adopted: (a) registration of all scans and quality control of the result (check of residuals), and (b) georeferencing using all control points including quality control by checking residuals.

Only 80 ha out of the total project area of 1500 ha was scanned within the first 6 months using the existing production capacity, which indicated that the scanning for the entire area of the project could occupy more than 8 years if the current scan rate of approximately 0.7 ha per day could not be increased. It was obvious that the project deadline could not be met; therefore it was decided to increase the production rate through the integration of a mobile system.

Mobile Terrestrial Laser Scanning

As a consequence, the scan progress was significantly increased in June 2007 by the introduction of a mobile mapping van from the Swedish company VISIMIND AB (Fig. 4),



FIG. 4. Sensor configuration on the VISIMIND mobile mapping van.

using a hybrid sensor system on the vehicle consisting of a terrestrial laser scanning system HDS4500, supported by GPS/IMU and digital cameras. This hybrid sensor system is described by Gajdamowicz et al. (2007) using similar equipment, while an early version of this sensor system without laser scanner is described by Gajdamowicz et al. (2001). In an accuracy evaluation using a testfield in Stockholm an accuracy of better than 10 cm (rms values for all three coordinate axes) could be achieved for the mobile mapping system using 28 check points as reference (Gajdamowicz et al., 2007). The sensor integration and the calibration of the system in the streets of Istanbul took some weeks, but field data acquisition was under way by the end of June 2007. The laser scanner's orientation was fixed in the horizontal direction, scanning only in the profile perpendicular to the direction of movement of the vehicle. It was initially operated with 25 scan profiles per second, later improved to a speed of up to 40 profiles per second (possible maximum according to the instrument specification: 50 profiles per second). The distance between neighbouring profiles was 2 to 3 cm at the beginning, corresponding to a van speed during scanning of 0.5 to 0.75 m s⁻¹ or 1.8 to 2.7 km h⁻¹.

Because of problems with the reception of the GPS signal in the narrow streets of the Historic Peninsula, control points were marked on the buildings every 5 m along each side of the street (Fig. 5). Some targets were removed or destroyed before scanning (Fig. 5 right) and were replaced by natural points such as window corners. Some targets were destroyed after scanning but before the geodetic determination of the object coordinates; they also had to be

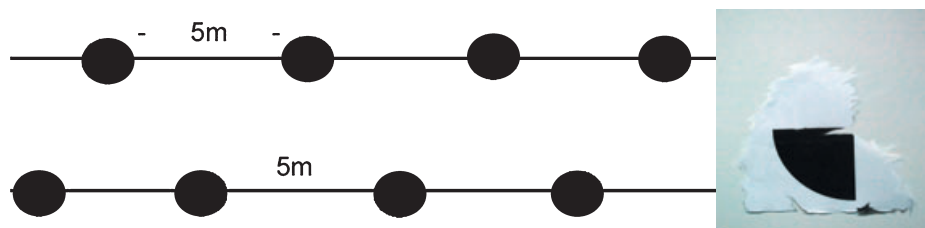


FIG. 5. Distribution of control points in the streets for mobile terrestrial laser scanning (left) and destroyed target (right).

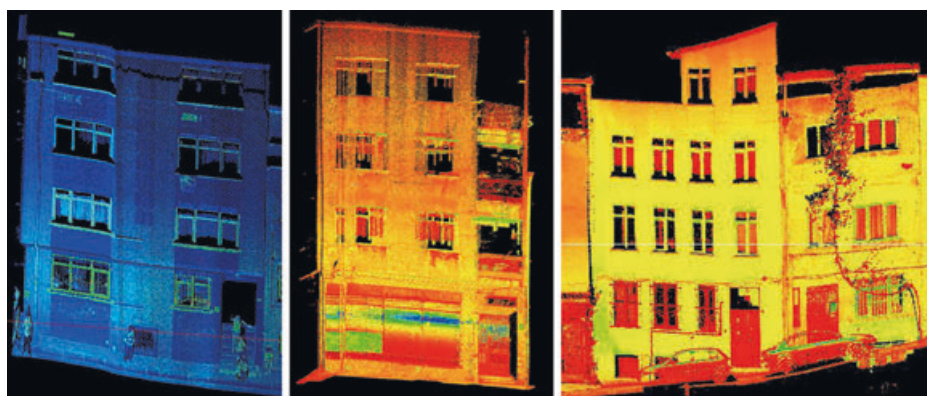


FIG. 6. Geometric problems from direct georeferencing of point clouds (from left to right: swinging façade, misfit at block corner and deformation of a façade).

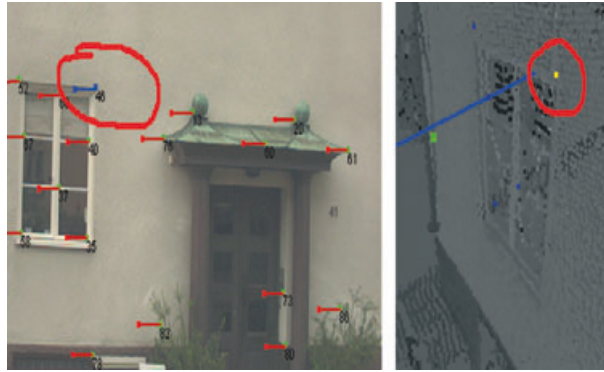


FIG. 7. Image tracking tool for “problematic” façades without control points.

replaced by natural points. The targets were emplaced by BİMTAŞ staff (4 to 5 people), while the determination of the target coordinates was performed by BİMTAŞ staff and additional subcontractors. BİMTAŞ staff measured additional natural ground control points, well distributed on the façades, in order to stabilise the in-house data processing of the mobile mapping system, while the subcontractors only measured the targets themselves. Not all control points were identified correctly in the point clouds, thus causing geometrical problems for the direct georeferencing and some geometric deformation of the point clouds including swinging or deformed building façades and misfit at block corners (Fig. 6). Nevertheless, the technical parameters of the hybrid systems were optimised in the course of the job, through recognition of these problems with the quality of the pre-processed point clouds.

For problematic façades where control points were missing, VISIMIND recently developed the “image tracking tool”, an automatic photogrammetric bundle adjustment enabling the bridging of longer distances without control points (Fig. 7). The procedure used is described by Gajdamowicz et al. (2007). After calculation of approximate coordinates of the sensors, in particular the coordinates of the camera and the laser scanner based on GPS/IMU integration, the extraction and tracking of features or objects visible in the image sequence is performed. The feature extraction is based on the Harris operator, while the automatic image tracking is based on feature-based matching. After tracking, a validation of the extracted features is carried out, which includes the elimination of blunders and the adding and tracking of new features to obtain a uniform distribution of tracked points in image space. In the next step, the approximate coordinates of all features tracked in the image sequences can be computed as intersections to the directions of the laser point cloud assuming a known offset between cameras and laser scanner. The correct coordinates of the tracked features in object space and the correct image orientation can be computed thereafter in a least squares bundle adjustment. Finally, the adjusted coordinates of the tracked points will be used to support the inertial navigation and for correcting the laser scanning point cloud.

The speed of data acquisition increased significantly as a result of the introduction of the VISIMIND mobile mapping system. By the end of August 2007, 33 blocks had been scanned in 33 working days. Usually, scanning could be carried out from 6:30 a.m. until 2:00 p.m. on 6 days per week (Monday to Friday plus Sunday; Saturdays are simply too busy in the streets of Istanbul). Thanks to this improvement, the laser scanning of the remaining 50 blocks using the mobile system was finished by 8th November 2007 with the improved total production rate



FIG. 8. Oblique and horizontal camera integration in the mobile system (left), image taken by oblique camera (right).

of ~ 600 m per hour, while post-processing of the multiple sensor data took until January 2008. The production ratio was mainly about 1:10, that is 10 hours of post-processing were needed per hour of scanning. In total, 12 operators of the laser scanning group were supporting the post-processing of mobile mapping system data during the major processing phase. Because of traffic restrictions and environmental conditions, approximately 2% of the area (30 ha) could not be scanned using the mobile system. This remaining 2% of the total area would require static laser scanning at the end of the project in order to complete the data acquisition and was likely to take at least 2 months using all available instruments.

Digital Photogrammetry

For photogrammetric documentation of the building façades, pre-calibrated SLR cameras (Nikon D70) with 14 and 28 mm lenses were used, as mentioned earlier. The images were processed in combination with the static terrestrial laser scanning data. When the mobile system was used for data acquisition, only the images of the integrated sideways-looking oblique and horizontal cameras (Fig. 8) were used for mapping. The oblique camera is rotated by approximately 34° upwards in relation to the lower (horizontal) camera, enlarging the vertical field of view of the camera system to approximately 86° , with the lowest part of the field of view of the horizontal camera inclined down towards the street.

MAPPING OF FAÇADES

The georeferenced point clouds from the laser scanning group were used for line mapping of the façades at a plot scale 1:200. The point clouds were segmented using Cyclone software before mapping (Fig. 9) to eliminate unnecessary points and to reduce the data volume to the requested minimal portions for the mapping software.

This project required the generation of façade maps at 1:200 scale. This extreme demand corresponds to a standard deviation of the positions of 0.2 mm in the map and 4 cm in the object space, but this extreme accuracy is required only as relative accuracy; for absolute

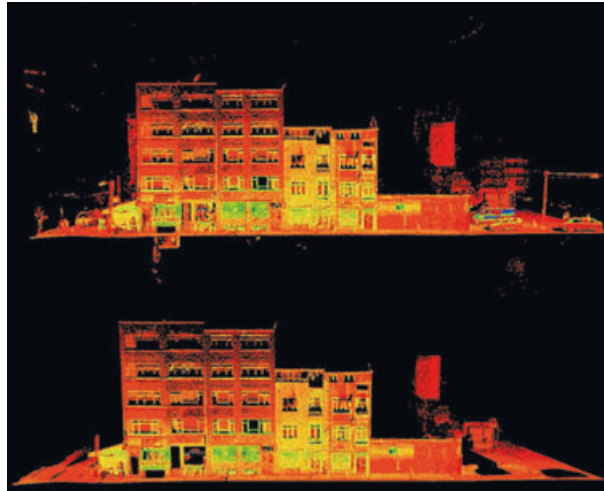


FIG. 9. Segmentation of a point cloud.

accuracy a standard deviation of 0.5 mm in the map, corresponding to 10 cm in object space should be sufficient. As a tolerance limit, 3 times the standard deviation has been accepted. Therefore, the control point configuration and accuracy had always to be checked to obtain this accuracy. While all problems of static and mobile scanning were solved, delay in the control point determination did constitute a bottleneck in production.

The façade mapping group consists of 34 operators using 34 licences of the Z-MAP Laser package from Menci Software (Arezzo, Italy), which is able to process laser scan data and rectified photogrammetric images simultaneously for line mapping with limited AutoCAD functionality. It was estimated that approximately 5 million m² of façades have to be mapped. The production rate was similar to the static laser scanning group: 80 ha with 32 operators in approximately 6 months. In terms of façade area, a total of 81 000 m² was completed in 39 days, which corresponds to 65 m² per person per day. In the course of the project the

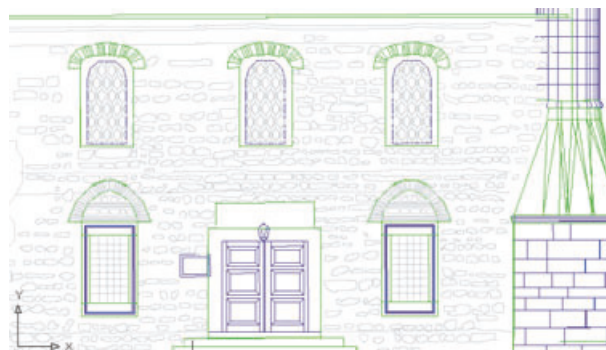


FIG. 10. Detailed mapping of a building façade based on laser scanning data and a photogrammetric image.

production rate more than doubled, from 60 m² of façade per day per operator in March 2007 on average, to 140 m² by October 2007. The total of 5 million m² of façade for mapping of the Historic Peninsula as a whole would thus correspond to an estimated mapping time of approximately 5 years with 34 operators working 210 days per year. This estimate indicated that the mapping could not be finished before the deadline of the project.

For data processing in Z-MAP, all related data of the segmented part (point cloud, Nikon image(s), camera calibration file) was saved in one directory using the name of the block plus a suffix, for example, 900_01. This block name is defined in the cadastral map. The HP xw8200 workstations used were equipped with dual Xeon processors (3.6 GHz), 4 GB RAM and NVIDIA graphic cards with 256 MB RAM. For façade mapping the point cloud and one oriented image of the façade were used. Thus, the orientation of the photogrammetric image (usually recorded with the 14 mm lens) had to be determined by resection in space using at least five well-distributed corresponding points (usually corners of windows) in the point cloud and in the image. For the adjustment of the spatial resection the calibration data of the pre-calibrated Nikon D70s were used. Usually the residuals of the control points were in the range of some millimetres, which indicated that the results were satisfactory. To carry out mapping with Z-MAP the images had to be rectified to the main plane of the façade. Therefore, the plane was defined by more than three points, which were measured in the point cloud and in the image. Thus, the photos were rectified to the main plane of the façades and shifted to parallel planes based on the point clouds. Based on the dense point clouds from the Leica HDS4500 scanners, mapping was often possible without support from the photographs, using the point cloud and its grey values as an image for interpretation. Nevertheless, the colour photos provided substantial help, particularly for the detailed mapping of bricks and stones (see Fig. 10) which represented a major obstacle to progress and significantly reduced the speed of mapping. Unfortunately, the architects, the major clients, could not be convinced to use digital orthophotos of the façades instead of the detailed maps at 1:200 scale. An example of the final



FIG. 11. Part of the final product from façade mapping using terrestrial laser scanning data and photogrammetric images.

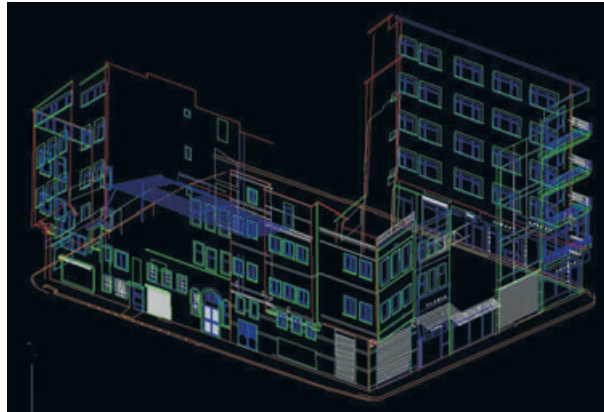


FIG. 12. Mapped 3D polylines of façades of a building block.



FIG. 13. 3D mapping of roofs using Menci Z-MAP Photo software in stereo mode.

product from façade mapping is depicted in Fig. 11, which is derived from 3D polylines as illustrated in Fig. 12. At the time of writing, the mapping of the building façades has still not been finished.

ROOF MAPPING

In early July 2007 a roof mapping group was established, in order to measure and model in 3D the roofs of all buildings within the area of the Historic Peninsula project. A project team of five operators started the new production line after 3 days of intensive training in mid-July using the Z-MAP Photo software (Fig. 13). At first UltraCamD images with 30 cm ground sampling distance (GSD) were used for data acquisition. Owing to the limited resolution of the digital imagery it was very difficult for the operators to measure small roofs. As a rule of thumb, mapping is possible up to 1:3000 map scale with 30 cm GSD, which was confirmed by the tests made in this group (Topan et al., 2004). Thus it was decided to use higher resolution imagery which became available in mid-August 2007, as scanned analogue colour aerial images with 9.5 cm GSD. This photography was obtained using a Jenoptik LC0030 camera ($f=305$ mm) at a photo scale of 1:4500. The photos were scanned with a resolution of $21\text{ }\mu\text{m}$ using a Zeiss SCAI scanner.

TABLE II. Accuracy investigations—differences between 3D roof corners from roof mapping using aerial imagery and from façade mapping using terrestrial laser scanning data at test sites of the Historic Peninsula.

<i>Test site</i>	<i>dx [cm]</i>	<i>dy [cm]</i>	<i>dz [cm]</i>	<i>3D vector [cm]</i>
A	−17.8	−42.6	11.1	47.5
B	−0.6	−18.8	−22.9	29.6
C	53.7	−1.8	−11.1	54.9
D	35.5	−6.4	18.7	40.6
E	17.9	45.1	10.7	49.7
F	−11.0	−14.6	−0.9	18.3
G	77.5	−54.9	5.3	95.2
H	21.8	109.2	3.9	111.5
I	63.8	16.4	−35.2	74.7
J	80.1	2.3	1.6	80.2
K	66.3	−13.9	42.3	79.9

In this part of the project an essential quality-defining task was the combination of the two different data-sets, from aerial imagery and mobile laser scanning systems, into one common data-set in the same coordinate system without any discrepancies caused by the different data acquisition sources. Therefore, the orientation of the aerial images was transformed to the same datum and coordinate system as was used for the laser scanning data, in order to carry out the mapping. The differences between façade corners and roof corners were mainly in the range of 18 to 112 cm (spatial 3D vector) for the accuracy investigations summarised in Table II. The accuracy investigations were carried out at 11 test sites, which were well distributed over the area of the Historic Peninsula. At each test site nine points in total were measured in three blocks (three points each) to check the differences. These differences mainly represent the effect of point definition—the extension of the eaves of each roof over the wall. In addition the following error sources exist: effects from datum transformation, accuracy of the orientation data, accuracy of the laser scanning data, identification of the roof corners in the images, and the definition of the roof corner and façade corner (rain spout). The last two sources for discrepancies (caused by measurement errors) have the biggest influence on the accuracy of the merged data generated from two different sensor systems (terrestrial laser scanning and aerial images). An example of the combination of 3D polylines of roofs from aerial images and 3D polylines of façades from terrestrial laser scanning data is presented in Fig. 14.



FIG. 14. Combination of data from two different sources: 3D polylines of roofs based on aerial images and 3D polylines of façades from terrestrial laser scanning data.

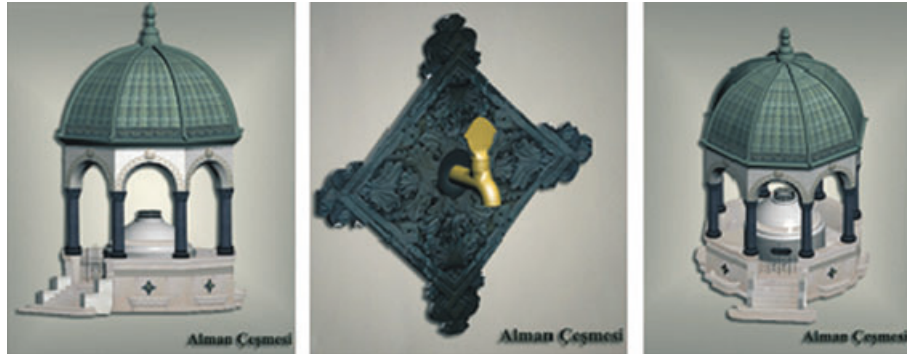


FIG. 15. Photorealistic and detailed 3D model of the “German Fountain” (generated with Autodesk 3ds Max).

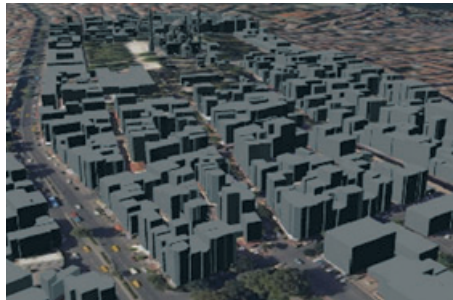


FIG. 16. Part of the 3D city model in LoD1 (block model generated from cadastral survey data).



FIG. 17. Part of the 3D city model in LoD2 (roof model generated by combining mapped roofs with the block model).

3D MODELLING OF CITY MODEL AND LANDMARKS

The modelling group started simultaneously with the façade mapping to model landmarks from laser scanning data. Therefore, the mapping group measured 3D polylines for the landmark and these were used for 3D modelling with Autodesk 3ds Max software (Fig. 15).

In December 2007 the group started to generate a 3D city model of the Historic Peninsula as a “block model” (LoD1 = Level of Detail 1) using only cadastral survey data (Fig. 16) and this work was finished after only 3 months. Currently, the modelling group is producing a more detailed 3D city model (LoD2; see Fig. 17) by combining the block model with the roofs mapped by the roof mapping group. A detailed description of the 3D modelling of the Historic Peninsula is given by Buhur et al. (2008).

CONCLUSION AND OUTLOOK

In executing the Historic Peninsula Project, BİMTAŞ was able to create a modern production environment with high-end technology and well-trained personnel. This team efficiently performed static and mobile terrestrial laser scanning for the entire area of the Historic Peninsula within 15 months, with the greatest volume of data being scanned by the mobile system within a 3-month period. In particular, the requirements of the project with respect to quality and deadlines for data delivery drove the parameters for optimising the production to ensure that a technical solution was always found for the requirement to increase the speed of data acquisition. Thus, the change from static to mobile terrestrial laser scanning for data acquisition significantly speeded up the scanning process.

BİMTAŞ learned many lessons concerning project management and tuning of technology to manage the requirements, so that the company is able to run similar projects elsewhere. However, the keys for successful projects are still the highly educated and trained personnel, who learned their skills by working for such a project as the Historic Peninsula, combined with efficient project planning. Istanbul has been selected as one of the European Cultural Capitals for 2010. Thus, many other projects will follow on from this one in the near future. A request has already been received to create LoD1 and LoD2 products for the area comprising the two sides of the lower part of the Bosphorus and including approximately 15 000 buildings.

REFERENCES

- BARBER, D., MILLS, J. and SMITH-VOYSEY, S., 2008. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1): 128–141.
- BAZ, I., KERSTEN, T., BÜYÜKSALİH, G. and JACOBSEN, K., 2008. Documentation of Istanbul Historic Peninsula by static and mobile terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5): 993–998.
- BUHUR, S., KERSTEN, T., BÜYÜKSALİH, G., JACOBSEN, K., BAZ, I., DURSUN, S. and SAGIR, D., 2008. 3D city modelling of Istanbul Historic Peninsula by combination of aerial images and terrestrial laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B7): 1239–1246.
- EL-SHEIMY, N., 2005. An overview of mobile mapping systems. *From Pharaohs to Geoinformatics. FIG Working Week 2005 and GSDI-8*. Cairo, Egypt. 24 pages. http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_17/ts17_03_elsheimy.pdf [Accessed: 11th February 2009].
- FRUEH, C. and ZAKHOR, A., 2003. Constructing 3D city models by merging ground-based and airborne views. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2: 562–569.
- GAJDAMOWICZ, K., ÖHMAN, D., ANDERSSON, K. and RISSE, K., 2001. Accuracy evaluation of mobile mapping technology for acquisition of position related information. *Optical 3-D Measurement Techniques V* (Eds. A. Gruen & H. Kahmen). Vienna. 587 pages: 153–164.
- GAJDAMOWICZ, K., ÖHMAN, D. and HOREMUZ, M., 2007. Mapping and 3D modelling of urban environment based on LIDAR, GPS/IMU and image data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/C55). 4 pages. http://www.cirgeo.unipd.it/cirgeo/convegna/mmt2007/proceedings/papers/gajdamowicz_krzysztof.pdf [Accessed: 11th February 2009].

- GANDOLFI, S., BARBARELLA, M., RONCI, E. and BURCHI, A., 2008. Close photogrammetry and laser scanning using a mobile mapping system for the high detailed survey of a height density urban area. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5): 909–914.
- GRÄFE, G., 2007. Quality management in kinematic laser scanning applications. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/C55). 6 pages. http://www.cirgeo.unipd.it/cirgeo/convegni/mmt2007/proceedings/papers/graefe_gunnar.pdf [Accessed: 11th February 2009].
- HUNTER, G., COX, C. and KREMER, J., 2006. Development of a commercial laser scanning mobile mapping system—StreetMapper. *Proceedings of the Second International Workshop “The Future of Remote Sensing”*, Antwerp, Belgium. 4 pages. <http://www.streetmapper.net/articles/Paper%20-%20Development%20of%20a%20Commercial%20Laser%20Scanning%20Mobile%20Mapping%20System%20-%20Pegasus.pdf> [Accessed: 11th February 2009].
- İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ PLANLAMA İMAR MÜDÜRLÜĞÜ, 2003. Tarihi Yarımada Eminönü-Fatih: 1/5000 Ölçekli Koruma Amaçlı Nazım İmar Planı Raporu, Vol. I. Istanbul. 381 pages.
- KREMER, J. and HUNTER, G., 2007. Performance of the StreetMapper mobile LIDAR mapping system in “real world” projects. *Photogrammetric Week '07* (Ed. D. Fritsch). Wichmann, Heidelberg. 350 pages: 215–225.
- SCHWARZ, K. P. and EL-SHEIMY, N., 2004. Mobile mapping systems: state of the art and future trends. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5): 759–768.
- TALAYA, J., ALAMUS, R., BOSCH, E., SERRA, A., KORNUS, W. and BARON, A., 2004. Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU orientation sensors. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5): 6 unnumbered pages. <http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm5/papers/190.pdf> [Accessed: 2nd February 2009].
- TOPAN, H., BÜYÜKŞALİH, G. and JACOBSEN, K., 2004. Comparison of information contents of high resolution space images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B4): 583–588.
- WORLD HERITAGE COMMITTEE, 2006. Report of the Joint ICOMOS/UNESCO Expert Review Mission to the Historic Areas of Istanbul World Heritage Site 6th to 11th April 2006. 52 pages. <http://whc.unesco.org/archive/2006/mis356-2006.pdf> [Accessed: 10th February 2009].

Résumé

Bien que la presque île historique du vieil Istanbul ait été ajoutée à la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO dès 1985, la documentation complète de ce lieu important n'a pas encore été entreprise. En 2006, la Direction de la Protection de l'Environnement Historique de la municipalité du Grand Istanbul a lancé le Projet Presqu'île Historique, qui couvre une zone de 1500 ha et inclut environ 48 000 bâtiments dans des rues très fréquentées et souvent étroites. BİMTAŞ, un département de la municipalité du Grand Istanbul, a immédiatement entrepris la documentation de tous les bâtiments de la zone du projet par balayage laser terrestre. Il a donc fallu relever le défi de mettre en place un environnement de production performant avec des technologies de pointe pour répondre aux exigences de ce projet dans un délai très court de deux ans. Ce papier décrit l'intégralité de l'environnement de production pour la documentation de tous les bâtiments, et détaille les multiples adaptations apportées au processus au gré des enseignements tirés de ce travail. Bien que l'environnement d'acquisition de données et de cartographie ait été mis en place pendant le processus de production, les solutions techniques ont dû être optimisées afin de respecter les exigences de qualité et les délais de livraison. Seulement 80 ha sur les 1500 ha attendus ont pu être couverts par balayage statique pendant les six premiers mois, ce qui a contraint au remplacement du balayage laser terrestre statique par un système mobile afin d'accélérer la production et de finaliser la phase d'acquisition de la grande zone restant à couvrir, au bout de trois mois.

Zusammenfassung

Obwohl die historische Halbinsel von Istanbul seit 1985 zur Liste des UNESCO Weltkulturerbes gehört, wurde bisher keine komplette Dokumentation dieses bedeutenden Gebietes durchgeführt. Im Jahr 2006 initiierte die Denkmalschutzbehörde der Stadtverwaltung von Istanbul das "Historic Peninsula Project", das eine Fläche von 1500 ha umfasst und ungefähr 48 000 Gebäude in überfüllten and vielfach engen Strassen beinhaltet. BİMTAŞ, eine Firma der Stadtverwaltung Istanbul, startete umgehend die Dokumentation der gesamten Gebäude in dem Projektgebiet durch terrestrisches Laserscanning. Dieses Projekt bedeutete eine große Herausforderung, da eine effiziente Produktionsumgebung mit neuer High-End Technologie aufgebaut werden musste, um die ehrgeizigen Projektanforderungen in einem sehr kurzen Zeitrahmen von zwei Jahren erfüllen zu können. Dieser Beitrag beschreibt den Aufbau der ganzen Produktionsumgebung zur Dokumentation des gesamten Gebäudebestandes auf der historischen Halbinsel, wobei regelmäßige Anpassungen der technischen Prozesse durch "learning on the job" erforderlich waren. Obwohl die Produktionsumgebung zur Datenerfassung und Kartierung erst im Laufe der Projektbearbeitung aufgebaut wurde, war es immer sehr wichtig, die technischen Lösungen laufend so zu optimieren, dass die Anforderungen an die Datenqualität und die Abgabetermine erreicht werden konnten. Nur 80 ha der beauftragten 1500 ha konnten mit dem statischen Laserscanning in den ersten sechs Monaten erstellt werden, so dass eine Änderung der Aufnahmestrategie vom statischen zum mobilen terrestrischen Laserscanning dringend notwendig war. Dadurch konnte die Datenerfassung entscheidend beschleunigt werden, so dass das Scannen des übrig gebliebenen Großteils der Fläche innerhalb von drei Monaten abgeschlossen werden konnte.

Resumen

Aunque la Península Histórica del viejo Estambul fue incluida en la lista de monumentos Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO en 1985, no se ha inventariado aún de forma completa esta importante área. En 2006 el Comité para la Protección del Entorno Histórico del Área Metropolitana de Estambul puso en marcha el Proyecto Península Histórica que abarca un área de 1500 ha e incluye unos 48 000 edificios en transitadas y estrechas calles. BİMTAŞ, un departamento del Área Metropolitana de Estambul, comenzó inmediatamente a documentar todos los edificios incluidos en el área usando un escáner láser terrestre. Esto planteaba el desafío de diseñar un eficiente entorno de trabajo con tecnología punta para cumplir con los requisitos del proyecto en el corto plazo de dos años. Este artículo describe el entorno de trabajo para documentar los edificios, detallando las frecuentes modificaciones del proceso realizadas sobre la marcha. Aunque la toma de datos y el cartografiado se fueron definiendo a lo largo del proyecto, fue esencial optimizar las soluciones técnicas para cumplir con los requisitos de calidad de datos y plazos de entrega. Sólo se completaron 80 ha de las 1500 ha mediante un escaneado estático en los primeros seis meses, lo que obligó a rectificar y continuar con un escaneado móvil con láser terrestre para acelerar los trabajos en el resto del área y concluir esta fase en tres meses.

4.2. Wasserbasiertes kinematisches Scanning (Bonus-Artikel)

Kapitel 4.2 veröffentlicht in der AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 123. Jhrg., Heft 10 (ISSN 0002-5968) als:

Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser

Integration of a Terrestrial Laser Scanning System into a Hydrographical Multi-Sensor-System for Kinematic Data Acquisition Above and Below Water

Autoren: Thomas P. Kersten^a, Volker Böder^a, Thomas Thies^b

^a HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

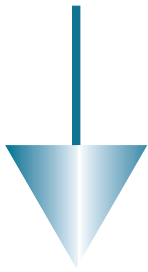
^b Hamburg Port Authority

Publikationsverlauf: eingereicht Februar 2011, akzeptiert April 2011, publiziert Oktober 2011

Vollständige Referenz: Kersten, Th., Böder, V., Thies, Th., 2011. Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser. AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 10, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 330-335.

Internet link: <http://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2011/avn-ausgabe-102011/2434-integration-eines-terrestrischen-laserscanners-in-ein-hydrographisches-multi-sensor-system-fuer-die-kinematische-datenerfassung-ueber-und-unter-wasser.html>

https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/Kersten_avn_6_2011.pdf



Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser

Integration of a Terrestrial Laser Scanning System into a Hydrographical Multi-Sensor-System for Kinematic Data Acquisition Above and Below Water

Thomas Kersten
Volker Böder
Thomas Thies

In diesem Beitrag wird die Integration eines terrestrischen Laserscanningsystems (TLS) auf einem schiffs-basierten Multi-Sensor-System zur simultanen Erfassung von 3D-Geodaten über und unter Wasser vorgestellt. Diese Systemintegration und erste Erfahrungen mit diesem speziellen Multi-Sensor-System sind in einer Zusammenarbeit zwischen der HafenCity Universität Hamburg (HCU) und der Hamburg Port Authority (HPA) entstanden. Dazu wurde in einem Pilotprojekt der terrestrische Laserscanner Riegl VZ-400 auf dem Vermessungsschiff „Deepenschriewer III“ der HPA eingesetzt, um das System in typischen Anwendungsgebieten der HPA zu testen. Als Testgebiet wurde der Grasbrookhafen nahe der neuen Hamburger Elbphilharmonie aufgenommen und mit Referenzdaten verglichen. Dabei konnte auch gezeigt werden, wie das Sensorsystem nachträglich kalibriert werden konnte, um so eine Genauigkeitssteigerung der 3D-Daten zu erzielen.

Schlüsselbegriffe: Mobile Mapping, Sensorintegration, Systemkalibrierung, terrestrisches Laserscanning

In this paper the integration of a terrestrial laser scanning system (TLS) on a ship-based multi-sensor system for simultaneous 3D geo-data acquisition above and below water is presented. This system integration and first experiences with this special multi-sensor system are developed in a co-operation between HafenCity University Hamburg (HCU) and Hamburg Port Authority (HPA). Therefore, the terrestrial laser scanner Riegl VZ-400 was used on the surveying ship „Deepenschriewer III“ of HPA in a pilot project, in order to test the mobile system in typical applications of HPA. As a test area the Grasbrookhafen, which is close to the new Hamburg Philharmonic Hall, was scanned with the mobile system and compared with reference data from static TLS. Finally, it could be shown, how subsequent system calibration could eliminate systematic errors and increase the accuracy of the 3D data.

Keywords: mobile mapping, sensor integration, system calibration, terrestrial laser scanning



ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach zweifacher
Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.

Tag der Einreichung: 26. Februar 2011

1 Einführung

Dreidimensionale Geodaten sind digitale Informationen, denen auf der Erdoberfläche und im Wasser eine bestimmte räumliche Lage zugewiesen werden kann. Diese Geodaten bilden einen wesentlichen Teil des in der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft vorhandenen Wissens, das auf allen Ebenen in Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft und vom Bürger zunehmend benötigt wird. Sie bilden die Grundlage des planerischen Handelns und ihre Verfügbarkeit ist eine maßgebliche Voraussetzung für Standort- und Investitionsentscheidungen. Das führt zu einem stetig steigenden Bedarf

an solchen Geodaten, wodurch hohe Anforderungen an die effiziente Erfassung (aktuelle und kostengünstige Daten) und umfangreiche Verfügbarkeit (schnell, einfach, flächendeckend und großmaßstäblich) gestellt werden. Daher bieten sich für eine effiziente 3D-Datenerfassung mobile Sensorsysteme (Mobile Mapping Systeme) in der Luft (Flugzeug, Helikopter), auf dem Land (Fahrzeug) und auf dem Wasser (Schiff) an.

In diesem Beitrag wird ein mobiles Multi-Sensor-System auf einem Vermessungsschiff im Hamburger Hafen vorgestellt, mit dem simultan über und unter Wasser 3D-Geodaten erfasst wurden. Dabei steht die Integration eines terrestrischen Laserscanningsystems (TLS) in ein schiff-basiertes Multi-Sensor-System, das mit Navigations- und hydrographischen Sensoren ausgestattet ist, im Vordergrund. Diese Systemintegration und die Erfahrungen mit diesem speziellen Multi-Sensor-System sind in einer Zusammenarbeit zwischen der HafenCity Universität Hamburg (HCU) und der Hamburg Port Authority (HPA) entstanden. Dazu wurde in einem Pilotprojekt der terrestrische Laserscanner Riegl VZ-400 auf dem Vermessungsschiff „Deepenschriewer III“ der HPA eingesetzt, um das System in typischen Anwendungsgebieten der HPA zu untersuchen und zu testen.

2 Mobile Multi-Sensor-Systeme

Mobile Multi-Sensor-Systeme werden schon seit fast zwei Jahrzehnten in Flugzeugen und auf Fahrzeugen eingesetzt. Gerade die Mobile Mapping Fahrzeuge mit integrierten terrestrischen Laserscannern haben sich in den letzten fünf Jahren auf dem Markt erfolgreich etabliert. Wenn terrestrische Laserscanner auf mobilen Plattformen (Fahrzeug, Schiff, Eisenbahn, etc.) im Profilmodus scannen, spricht man auch vom mobilen Laserscanning. So berichten u. a. verschiedene Autoren über den land-basierten Einsatz solcher Aufnahmesysteme in verschiedenen Ländern: TALAYA et al. (2004), GAJDAMOWICZ et al. (2007), GRÄFE (2007), KREMER & HUNTER (2007), GANDOLFI et al. (2008), KERSTEN et al. (2009). In den letzten Jahren hat man das Potential terrestrischer Laserscanner auch für hydrographische Anwendungen auf Multi-Sensor-Schiffen erkannt. ALHO et al. (2009) berichten vom Einsatz eines terrestrischen Laserscanners auf einem Boot zur Vermessung von Flüssen in Finnland, während VAN RENS et al. (2007) den Einsatz eines Riegl LMS-Z420i in Kombination mit RTK-GPS und einem Applanix Inertialsystem POS MV 320 im Hafen von Norfolk (Virginia, USA) beschreiben. BÖDER et al. (2010) stellen die erste Sensorintegration von zwei terrestrischen Laserscannern (Z+F IMAGER 5006i und Riegl VZ-400) auf zwei verschiedenen Schiffen für Tests im Hamburger Hafen vor, während STUDNICKA (2011) den Einsatz des Riegl VMX-250 Mobile Laser Scanning Systems auf einem Boot zur Erfassung der Paläste am Canal Grande in Venedig präsentiert. Moderne Multi-Sensor-Systeme auf einem Schiff können heute wie folgt ausgestattet sein (Abb. 1): Terrestrische Laserscanner zur 3D-Datenerfassung über Wasser, Fächerecholot zur Strukturierung unter Wasser, GNSS zur kinematischen Positionsbestimmung von Laserscanner

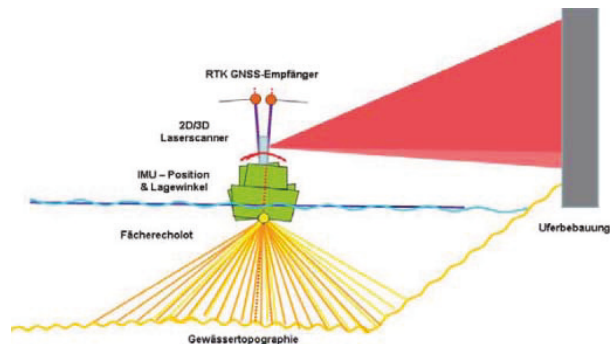


Abb. 1: Schematischer Überblick über die eingesetzten Sensoren an Bord eines Vermessungsschiffes (BöDER 2010)

und Echolot und Inertiale Messeinheit (IMU) zur Bestimmung der Lagewinkel und zur Stützung von GNSS. Die Raumvektoren zwischen den einzelnen Sensorsystemen im Schiffskoordinatensystem werden durch geodätische Messverfahren bei Installation des Systems sehr genau bestimmt. Basierend auf der Positionsbestimmung der GNSS-Antenne werden die Messungen des Laserscanners und des Fächerecholots mit Hilfe der Lagewinkel und der Raumvektoren in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert.

3 Sensorintegration des terrestrischen Scanners Riegl VZ-400

Laserscanner lassen sich im Prinzip bezüglich der Integration in ein hydrographisches Multi-Sensor-System ähnlich behandeln wie Fächerecholote. In der hydrographischen Aufnahmesoftware QINSy wurde eine Schnittstelle für den Riegl VZ-400 erstellt, so dass die Daten an Bord der „Deepenschriewer III“ mit Fächerecholotdaten fusioniert werden können. 3D-Position und Lagewinkel werden über den inertialen Sensor IXSEA HYDRINS (Heading (1σ) $\pm 0.034^\circ$ (abhängig von der geographischen Breite in Hamburg: 54°), Roll/Pitch (1σ) $\pm 0.01^\circ$) in Kombination mit einem GNSS-Empfänger TRIMBLE SPS851H (Zephyr 2 Antenne, Korrekturdaten vom Dienst Trimble VRS-NOW) bereitgestellt. Das eingesetzte Fächerecholot Reson Seabat 8101 besitzt folgende technischen Daten: 101 Beams (akustisches Signal), 150° Fächerbreite, Messrate bis 40 Hz, Reichweite 300 m, 1.5° Beamöffnung, Punktabstände $0.5\text{m}@20\text{m} / 1.3\text{m}@50\text{m}$. Die Objektkoordinaten werden in Echtzeit in der Software QINSy bestimmt und angezeigt. Folgende Aspekte müssen bei der Sensorintegration berücksichtigt werden: (a) Zeitsynchronisierung aller beteiligten Sensoren, (b) Online & Offline Datenfusion zu georeferenzierten Punktwolken, (c) Bestimmung der Lagewinkeloffsets aller Sensoren zueinander und (d) Beseitigung von restlichen systematischen Einflüssen.

Abb. 2 zeigt den Aufbau des Systems auf dem Dach der „Deepenschriewer III“. GNSS-Antenne, IMU und TLS wurden längs der Schiffsachse in einem Abstand von jeweils 30 cm auf einer Platte montiert. Die unmittelbare



Abb. 2: Installation des TLS Riegl VZ-400 an Bord der „Deepenschriewer III“.

Nähe der Sensoren zueinander reduziert mögliche Fehler- einflüsse bei der geodätischen Einmessung der Sensoren in das Schiffskordinatensystem und bei der Fusion der Messdaten. Ein detaillierte Beschreibung des Vermes- sungsschiffes und der eingesetzten Sensoren ist in BÖDER et al. (2010) und in THIES (2011) zu finden.

4 Systemkalibrierung

Nach der geodätischen Einmessung der Sensoren erfolgt die Verknüpfung der Sensoren an Bord zu einem integrier- ten System über LAN, RS-232 und USB-Verbindungen. Die Zeitsynchronisation wird über einen PPS-Puls reali- siert, der von den an Bord befindlichen GNSS-Sensoren generiert werden kann. In der an Bord installierten Soft- ware QINSy ist ein Treiber für den Riegl VZ-400 integ- riert, so dass eine Einbindung problemlos möglich ist. Die Lagewinkeloffsets werden durch verschiedene Scandaten von markanten Gebäuden (Abb. 3) und Molen (Abb. 5) in QINSy bestimmt, in dem in zwei aufgenommenen Profilen (hin und zurück) Kanten und Flächen mit einander ver- glichen werden.

So wurden am Getreideterminale in Hamburg (Reihe) die Lagewinkeloffsets für Roll & Pitch bestimmt (Abb. 3). Bei einer senkrecht stehenden Mauer verursacht ein Fehler bei der Kalibrierung des quer zur Kursrichtung wirken- den Rollens (Roll) eine Neigung der Mauer ebenfalls quer zur Fahrtrichtung. Analog wirken sich Fehler des in Längsrichtung des Schiffes wirkenden Stampfens (engl. pitch) aus. Nach Anbringen der Kalibrierparameter kön-

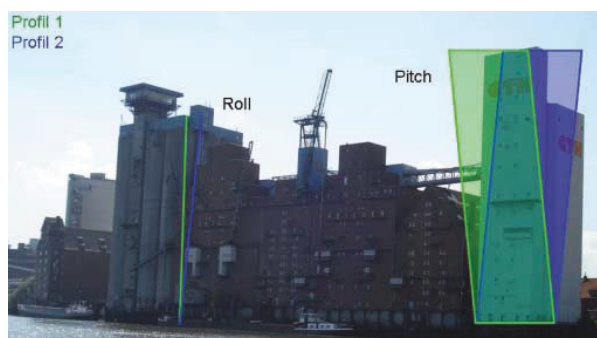


Abb. 3: Lagewinkel-Kalibrierung (Roll & Pitch) am Getreideterminale Hamburg (Reihe) durch Vergleich verschiedener Scandaten (Profil 1 & Profil 2). Die Lagewinkeloffsets wurden zur Verdeutlichung wesentlich vergrößert.

nen die Effekte bereits in Echtzeit weitgehend eliminiert werden, wie in Abb. 4 ersichtlich ist.

An einer Mole nahe der Schiffliegeposition wurde der Lagewinkel Heading (Kurs) korrigiert. Das Ergebnis zweier Profilmessungen in unterschiedlicher Entfernung von der Mole ist in Abb. 5 zusammengefasst. Der Vergleich der Profile zeigt signifikante Lagewinkeloffsets, die nachträg- lich aus Scandaten bestimmt wurden.

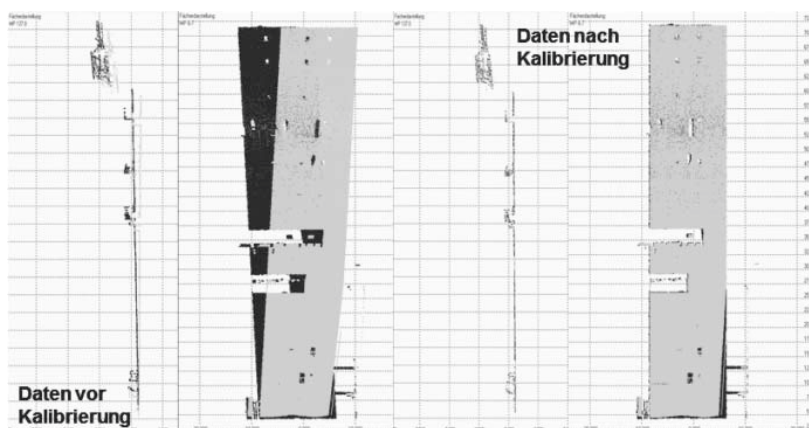


Abb. 4: Ergebnis der Lagewinkel-Kalibrierung (Roll & Pitch) am Getreideterminale Hamburg (Reihe) anhand verschiedener Scandaten (Profil 1 & Profil 2).

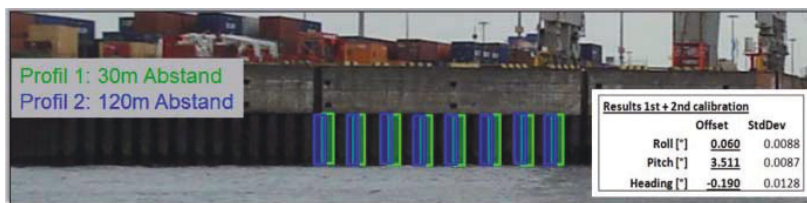


Abb. 5: Lagewinkel-Kalibrierung (Heading) an einer Mole durch Vergleich verschiedener Scandaten (Profil 1 & Profil 2) mit unterschiedlichen Abständen und Ergebnisse der Kalibrierung.



Abb. 6: Schrägansicht des Grasbrookhafens in der Hamburger HafenCity im veralteten Luftbild mit Gebäuden in Google Earth

5 Genauigkeitsuntersuchungen

Um systematische Effekte in den kinematisch aufgenommenen Laserscanningdaten zu detektieren, wurden drei Profile im Grasbrookhafen in der Hamburger HafenCity als Testdaten aufgenommen. Das Aufnahmegebiet ist in Abb. 6 veranschaulicht, wobei der nördliche und der östliche Bereich des Grasbrookhafens jedoch heute schon voll bebaut und in Nutzung sind. Der Hafenbecken ist in Ost-West etwa 450 m lang und in Nord-Süd-Richtung 60 m bis 110 m breit. Die „Deepenschriewer III“ fuhr etwa 20 m vom Ufer entfernt, um auch die Kaianlagen bis zur Wasserlinie mit aufnehmen zu können. Drei Profile wurden nacheinander aufgenommen und analysiert: Zwei Profile beginnen am südlichen Ufer von West nach Ost und führen am nördlichen Ufer von Ost nach West zurück. Das dritte Profil beginnt am nördlichen Ufer von West nach Ost und endet am südlichen Ufer mit einem Ost-West-Profil. Mit den Bezeichnungen A und B sind in der Abb. 7 Untersuchungsstellen markiert, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Bei der Markierung A ist ein Bauzaun aufgenommen worden (siehe Abb. 8). Die seitlichen Rahmen der Elemente bestehen aus 4 cm dicken Rohren, die oberen und unteren

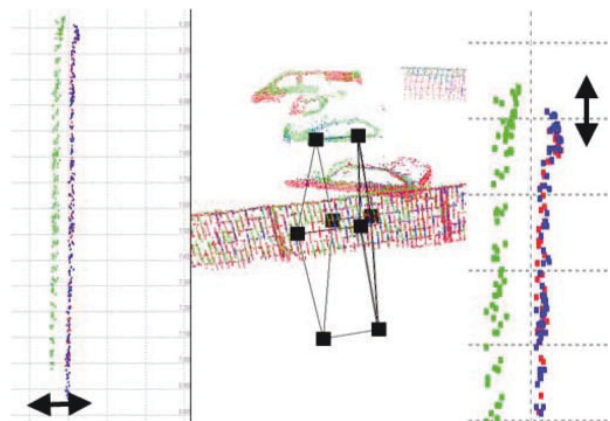


Abb. 8: Genauigkeitsanalysen anhand eines Bauzauns (Mitte) am südlichen Ufer des Grasbrookhafens (Marke A in Abb. 7) zeigen Abweichungen in der Lage von ca. 7 cm (links) und in der Höhe von ca. 4-5 cm (rechts) beim Vergleich zweier Profile mit entgegengesetzter Fahrtrichtung.

Rahmen aus 2,5 cm dicken Rohren. Der Bauzaundraht hat eine Dicke von 3 mm und ist in 10 cm × 25 cm-Rechtecken aufgebaut. Der Bauzaun ist in allen Profilen deutlich identifizierbar, auch ein Teil der dünnen Drähte sind gut zu erkennen. Der Vergleich der Koordinaten, die für diesen Bauzaun ermittelt wurden, ergab, dass die Ergebnisse der West-Ost-Profil 1 und 3 in Lage und Höhe in etwa um 1-2 cm voneinander abweichen. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis, die Unterschiede sind in den Darstellungen kaum zu definieren. Das Ost-West-Profil 2 weicht dagegen aber in der Lage um 7 cm und in der Höhe um 5 cm von den West-Ost-Profilen ab.

Diese Abweichungen konnten auch am nördlichen Ufer in Abb. 9 nachgewiesen werden. Hier wurden Analysen sowohl an einer zurückliegenden Hausfront und in der Kai-mauer durchgeführt, die jeweils vergleichbare Ergebnisse (7 cm in der Lage, 4 cm in der Höhe) mit dem Südufer

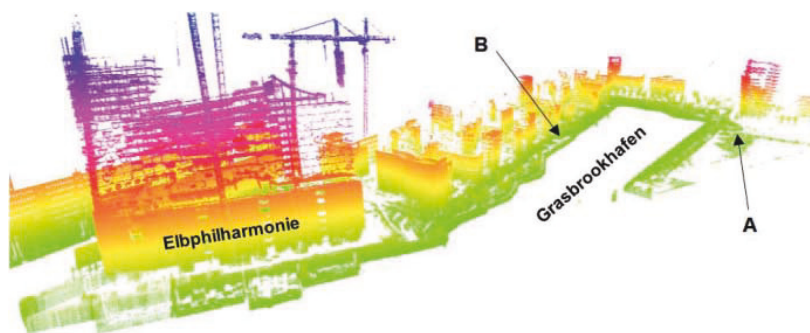


Abb. 7: Erfasste Scandaten (farblich höhenkodierte Darstellung) vom Grasbrookhafen mit Testgebieten A und B.

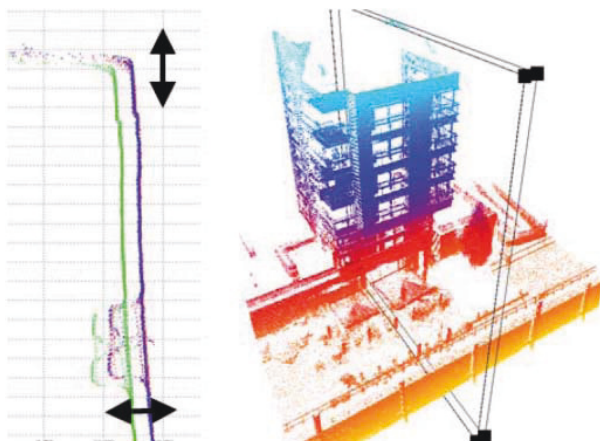


Abb. 9: Genauigkeitsanalysen an der Kaimauer (Marke B in Abb. 7) zeigen Abweichungen in der Lage von ca. 7 cm (Pfeil links unten) und in der Höhe von ca. 4–5 cm (Pfeil links oben) beim Vergleich zweier Profile mit entgegengesetzter Fahrtrichtung.

ergaben. Die Koordinaten des abweichenden Profils 2 lagen stets weiter vom Schiff entfernt, so dass von einer Systematik ausgegangen werden muss. Dies kann beispielsweise durch eine Abweichung in der Einmessung der Sensoren an Bord um 3,5 cm quer zur Längsrichtung des Schiffes verursacht worden sein, was durch Postprocessing der Daten in der Software QINSy kalibriert werden kann.

Die Abweichung der Lagewinkelbestimmung bzw. eine ungenau kalibrierte Ausrichtung der Sensorachsen zueinander wurden durch den Vergleich langer linearer Strukturen längs zur Fahrtrichtung in unterschiedlichen Entfernungen zum TLS wie in Kapitel 4 beschrieben analysiert. Dabei konnten die Lagewinkeloffsets bestimmt und korrigiert werden (siehe Abb. 3–5).

Für weitere Genauigkeitsaussagen wurden Referenzdaten herangezogen. Die Gebäudereihe im nördlichen Grasbrookhafen wurde mit dem Riegl VZ-400 von der gegenüberliegenden südlichen Seite von drei verschiedenen Scannerstandpunkten aufgenommen. Die Aufnahmezeit für das statische Scanning betrug ca. 5 Stunden, während ein Profil vom gesamten Grasbrookhafen innerhalb von 15 Minuten aufgenommen wurde. Die Entfernung des Scanners zu ausgewählten Testobjekten lag zwischen 90–150 m, während das Schiff bei der Aufnahme nur 35–65 m von diesen Objekten entfernt vorbeifuhr. Beim Vergleich von Flächen an Gebäuden wurde nur eine Differenz von ± 1 cm zwischen den Referenzdaten und den mobil erfassten Scandaten festgestellt. Gerade in den un-

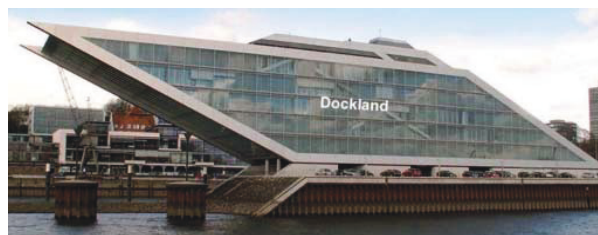


Abb. 10: Testobjekt Docklands im Hamburger Fischereihafen.

teren Bereichen der Gebäude passten beide Datensätze somit recht gut zusammen. Allerdings sind kleinere höhenabhängige systematische Effekte sichtbar. Diese werden insbesondere bei Gebäudehöhen ab 30 m sichtbar, dort schwingen die mobilen Daten deutlich um die Referenzdaten.

Um diese systematischen Bewegungseffekte genauer untersuchen zu können, wurde mit dem Gebäude Docklands im Hamburger Fischereihafen ein passendes Testobjekt vom Multi-Sensor-Schiff aus gescannt (Abb. 10).

Bei der Analyse der Scandaten zeigten sich in den horizontalen Gebäudeliniien wiederum die schwingenden Bewegungseffekte, die durch systematische Artefakte aus den Bewegungsdaten verursacht werden (Abb. 11 links oben). Dabei stellte sich heraus, dass ein Zeitfehler in einem verwendeten Protokoll der Bewegungsdaten der inertialen Messeinheit IXSEA HYDRINS von +25ms vorlag, der nach Überprüfung durch den Hersteller bestätigt wurde. Aufgrund der Schiffsdynamik wirkt sich dieser Fehler insbesondere auf den Rollwinkel und damit auf die Höheninformation bei Aufnahme des Gebäudes aus. Nach Korrektur der falschen Zeitsynchronisierung lagen die anschließend korrigierten Gebäudedaten ohne offensichtlichen systematischen Fehler vor, wie in der Abb. 11 (rechts oben) dargestellt ist. Die Restklaffungen der Höheninformationen wurden dadurch signifikant reduziert.

6 Anwendungsbeispiele

Die Systemintegration und -erweiterung durch einen terrestrischen Laserscanner an Bord eines Vermessungsschiffes vergrößert das Anwendungsspektrum des Vermessungsschiffes. Potentielle Anwendung ist beispielsweise die Ergänzung der hydroakustisch gewonnenen bathymetrischen Daten in Uferbereichen durch Laserscanning und damit tideunhängigere Arbeit. In Verbindung mit dem simultanen Einsatz eines hochauflösenden Fä-

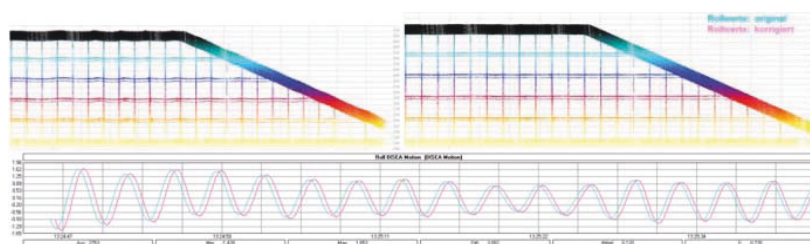


Abb. 11: Genauigkeitsanalysen am Testobjekt Docklands: schwingende Linien in den Originaldaten (links oben) und gerade Linien in den korrigierten Daten (rechts oben). Darstellung der originalen und der zeitkorrigierten Rollwerte (unten).

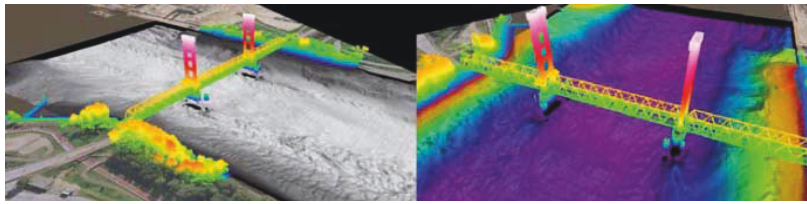


Abb. 12: Anwendungsbeispiel für mobiles Laserscanning auf einem Schiff: Simultane 3D-Erfassung von Flusstopographie unter und entlang der Wasserstraße.

cherecholots können Hafen- und Uferbauwerke wie Spundwände, Kaimauern, Böschungen, Vorsätze, Hochwasserschutz-Wände und anderes regelmäßig über und unter Wasser überwacht werden. Eine flächendeckende, kontinuierliche Erfassung der topographischen Hafenbestandsdaten im Gewässerbereich inklusive Betonung und Dalben ermöglicht die Erstellung eines 3D-Hafenmodells. Das mobile Laserscanning auf dem Schiff erlaubt eine einfache Vegetationskartierung an Uferbereichen. Durch die Erzeugung von „Lichttraumprofilen“ in Brückendurchfahrten und bei Oberleitungen wird die nautische Verkehrssicherheit erhöht (Abb. 12). Durch Aufnahme von 3D-Daten mit einem terrestrischen Laserscanner auf einem Schiff wird die Beweissicherung bei z.B. Schiffshavarien unterstützt. Die Beobachtung von Schiffsdynamiken wie zum Beispiel die Bestimmung des Trimmverhaltens (squat und settlement) stellt eine weitere mögliche Anwendung dar.

7 Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine erfolgreiche Integration eines terrestrischen Laserscanningssystems (Riegl VZ-400) in das Multi-Sensor-Messschiff „Deepenschriewer III“ vorgestellt. Dabei erfolgte die Kombination von TLS, Fächerecholot und inertialer Messeinheit problemlos durch Zeitsynchronisation mit einem PPS-Puls über GNSS in der hydrographischen Aufnahmesoftware QIN-Sy. Es hatte sich jedoch bei den durchgeführten Tests mit dem Multi-Sensor-System gezeigt, dass trotz präziser Sensoreinmessung eine Systemkalibrierung für genaues mobiles Scanning erforderlich ist, um anschließend erfasste Daten online verarbeiten zu können. Mit diesem System sind hohe Messgenauigkeiten (besser als $\pm 2\text{cm}$ für die Objektpunktbestimmung) auch bei hohen Messentfernungen möglich, wenn inertielle Messsysteme mit höchster Genauigkeit wie der IXSEA HYDRINS eingesetzt werden. Damit stellen solche Multi-Sensor-Systeme ein hohes Potential für viele Anwendungen in Häfen dar. Der Riegl VZ-400 wurde bereits auch erfolgreich in das System an Bord des HCU-Vermessungsbootes Level-A integriert. Weitere Untersuchungen werden nach Sensorintegration einer genaueren IMU von iMAR (iNAV-RQH-1003) in das Schiff folgen. Dabei wird auch geprüft, in wie weit 3D-Objekte aus solchen mobilen Laserscanningdaten effizient modelliert werden können.

8 Literatur

- [1] ALHO, P., KUKKO, A., HYYPPÄ, H., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J. & A. JAAKKOLA (2009): *Application of boat-based laser scanning for river survey*. Earth Surface Processes and Landforms 34, 1831–1838.
- [2] BÖDER, V. (2010): *HCU-HMSS: A Multi Sensor System in Hydrographic Applications*. 2nd International Conference on Machine Control & Guidance, Schulze-Lammers, Kuhlmann (Eds.), Bonn, March 9–11, pp. 65–74.
- [3] BÖDER, V., KERSTEN, Th., HESSE, C., THIES, Th., EHM, M. & A. SAUER (2010): *Scannen unter und über Wasser durch Sensorintegration von GNSS/IMU, Echolot und terrestrischem Laserscanner*. GNSS 2010 – Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert – Beiträge zum 100. DVW-Seminar am 4. und 5. Oktober 2010 in Köln, Schriftenreihe des DVW, Band 63, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 193–212.
- [4] GAJDAMOWICZ, K., ÖHAMN, D. & M. HOREMUZ (2007): *Mapping and 3D Modelling of Urban Environment Based on LIDAR, GPS/IMU and Image Data*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(5/C55).
- [5] GANDOLFI, S., BARBARELLA, M., RONCI, E. & A. BURCHI (2008): *Close Photogrammetry and Laser Scanning Using a Mobile Mapping System for the High Detailed Survey of a Height Density Urban Area*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5): 909–915.
- [6] GRÄFE, G. (2007): *Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum*. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- [7] KERSTEN, Th., BÜYÜKSALIH, G., BAZ, I. & K. JACOBSEN (2009): *Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning*. The Photogrammetric Record, 24(126): 122–138.
- [8] KREMER, J. & G. HUNTER (2007): *Performance of the StreetMapper mobile LIDAR mapping system in „Real World“ projects*. Photogrammetric Week 07, Fritsch (Ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 215–225.
- [9] TALAYA, J., ALAMUS, R., BOSCH, E., SERRA, A., KORNU, W. & A. BARON (2004): *Integration of a Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation*. Sensors. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B5).
- [10] STUDNICKA, N. (2011): *RIEGL VMX-250 Mobile Laser Scanning System am Beispiel der Paläste am Canal Grande, Venedig*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Th. LUHMANN/C. MÜLLER (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, pp. xxx–xxx.
- [11] THIES, T. (2011): *A Vessel-Based Mobile Mapping System – From Sensor Integration to Multipurpose Products*. Unveröffentlichte Masterarbeit an der HafenCity Universität Hamburg, Januar.

- [12] VAN RENS, J., SILVA, A., CANTER, P. & R. BRENNAN (2007): *Surface Imaging Capabilities on Marine Hydrographic Vessels*. U.S. Hydro 2007 Conference, Norfolk, Virginia, USA, www.thsoa.org/hy07/12_04.pdf.

Anschriften der Autoren:

THOMAS KERSTEN
HafenCity Universität Hamburg
Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg
E-Mail: thomas.kersten@hcu-hamburg.de

VOLKER BÖDER
HafenCity Universität Hamburg
Labor für Marine Geodäsie
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg
E-Mail: volker.boeder@hcu-hamburg.de

THOMAS THIES
Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg
E-Mail: thomas.thies@hpa-hamburg.de

5. Alternative Verfahren für die Generierung von Punktwolken

Im letzten Kapitel 5 wird der kummulative Teil der Dissertation mit einem weiteren Fachartikel über die „Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications“ (Kap. 4.1) abgeschlossen, der ein alternatives Verfahren zu den scannenden Messsystemen vorstellt und erörtert.

Kapitel 5 veröffentlicht in PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 6/2012 (ISSN 1432-8364) als:

Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications

Autoren: Thomas P. Kersten^a, Maren Lindstaedt^a

^a HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

Publikationsverlauf: eingereicht April 2012, akzeptiert August 2012, publiziert Dezember 2012

Vollständige Referenz: Kersten, T., Lindstaedt, M., 2012. Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 6, 727-740.

Internet link: http://www.dgpf.de/pfg/2012/pfg2012_6.pdf

Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services

THOMAS P. KERSTEN & MAREN LINDSTAEDT, Hamburg

Keywords: 3D, automation, comparison, image matching, modelling, point cloud, reconstruction

Summary: Constant improvements in the performance of internet and computer technologies combined with rapid advancements in computer vision algorithms now make it possible to efficiently and flexibly reconstruct the 3D geometry of objects. Objects of different sizes can be modelled using image sequences from commercial digital cameras that are processed by web services and freely available software packages, forming low-cost systems for numerous applications (restoration, historical care of monuments, visualization, analysis of the state of construction and the damage, etc.). In this contribution various cultural objects (historical buildings, statues/figures, archaeological finds, etc.) have been reconstructed in order to investigate the potential of this technology which enables the automatic generation of 3D point clouds or surface models (as 3D polygons) with photo-realistic texture from image data. These so-called low-cost systems represent an efficient alternative to expensive terrestrial laser scanning systems for the as-built documentation of 3D objects in architecture, cultural heritage and archaeology. The accuracy of the automatically generated 3D models is assessed by comparison with results from terrestrial laser scanning.

Zusammenfassung: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie durch open-source Software und Webservices. Durch die stetig zunehmende Leistungsfähigkeit des Internets und der Computertechnologie sowie der raschen Weiterentwicklung von Computer Vision Algorithmen ist es heute möglich, die 3D-Geometrie von Objekten unterschiedlicher Größe mit handelsüblichen digitalen Kameras als Low-Cost-Systeme für zahlreiche Anwendungen (Restaurierung, historische Denkmalpflege, Visualisierung, Analyse des Bauzustandes und der Beschädigung, etc.) effizient und flexibel in Bildsequenzen zu erfassen. Anhand von diversen Kulturobjekten (historische Gebäude, Statuen/Figuren, archäologische Fundstücke, etc.) wird in diesem Beitrag das Potential von Webservices und frei verfügbaren Softwarepaketen aufgezeigt, mit denen 3D-Punktwolken oder Oberflächenmodelle (als 3D-Polygone) mit fotorealistischer Textur automatisch aus Bilddaten erzeugt werden. Diese so genannten Low-Cost-Systeme stellen heute für die As-Built-Dokumentation von 3D-Objekten in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie eine effiziente Alternative zu teuren terrestrischen Laserscanningsystemen dar. Die Genauigkeit der automatisch erzeugten 3D-Modelle wird durch den Vergleich mit Ergebnissen des terrestrischen Laserscannings aufgezeigt.

1 Introduction

As state-of-the-art geodetic measuring methods photogrammetric multi-image techniques and, increasingly, terrestrial laser scanning,

as a standalone system or in combination with other methods, are used for precise 3D data acquisition of complex objects. Requirements for the generation of 3D models are often very high with respect to level-of-detail, complete-

ness, reliability, accuracy (geometrical and visual quality), efficiency, data volume, costs and operational aspects, but the priority order depends upon the object to be recorded.

However, in recent years, real alternatives to classical systems and methods are presented by the large number of digital cameras on the market, which can be efficiently and successfully used as passive low-cost sensors when combined with appropriate algorithms such as structure-from-motion (SfM) and/or dense image matching for different 3D applications (object reconstruction, navigation, mapping, tracking, recognition, gaming, etc.). Due to the very low costs and current approval for open-source methods such systems (sensors in combination with appropriate algorithms) are very popular in many application fields. Nevertheless, the metrological aspect should not be neglected, if these systems are to be acknowledged as serious measuring and modelling procedures. Therefore, clear statements about the accuracy potential and efficiency of such systems must be empirically investigated through appropriate testing. In this context the 3D modelling results must be also analysed and compared with respect to reference data.

Practical examples of image-based modelling have been reported by KERSTEN et al. (2004), KERSTEN (2006) and REMONDINO & MENNA (2008), while REMONDINO et al. (2008) generate comparable results for the 3D documentation of cultural monuments using image-based and range-based procedures in comparison. BARAZZETTI et al. (2009) present the combined use of photogrammetric and computer vision procedures for automatic and exact 3D modelling of terrestrial objects. They also show that similar results can be achieved with image-based and range-based recording

systems. BARTHELSEN et al. (2012) present an approach for detailed and precise automatic dense 3D reconstruction of urban scenes using possibly unordered image sets from consumer cameras on a small unmanned aerial system.

In this paper the potential of web services and freely available software packages is investigated on the basis of practical examples where 3D point clouds or surface models (as 3D polygons) with photo-realistic texture are automatically derived from image data. After a brief introduction to the applied software in section 2 the entire workflow for the image-based low-cost 3D reconstruction procedure (section 3) is outlined. Practical results and 3D comparisons with reference data are summarized in section 4.

2 Applied Software

For investigation of the automatic generation of 3D point clouds and 3D surface models from image data the following software packages and/or web services were used: Bundler/PMVS2 and VisualSFM (open-source software), Microsoft Photosynth (web service), and Autodesk Photofly and/or 123D Catch Beta (web service).

2.1 Bundler/PMVS2

Bundler (SNAVELY et al. 2008) and PMVS2 (patch based multi view stereo software, FURUKAWA & PONCE 2010) were developed at the University of Washington in Seattle (USA) in C and C++ under the GNU General Public License as freely available software. Bundler works as a structure-from-motion (SfM) procedure for arbitrarily arranged imagery and

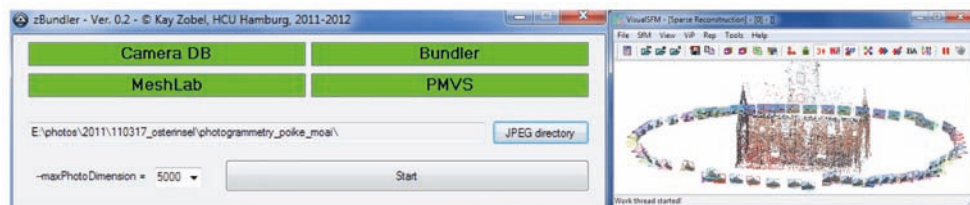


Fig. 1: Left: HCU graphical user interface (GUI) for the automatic workflow of Bundler/PMVS2; right: GUI for accelerated data processing with VisualSFM.

was developed for Microsoft's Photo Tourism Project (SNAVELY et al. 2006). Feature extraction in the images is performed by the SIFT (scale invariant feature transform) algorithm from LOWE (2004). The software supports camera calibration data (focal length f from EXIF data, two radial distortion parameters k_1 and k_2), image orientations and a thin 3D point cloud (scene geometry) as results for any image blocks using a modified bundle block adjustment from LOURAKIS & ARGYROS (2004). The results of Bundler are used in PMVS2 in order to generate a denser point cloud of non-moving objects by dense image matching. As well as the 3D coordinate each point additionally receives the colour value of the object taken from the images.

For use at HCU Hamburg a graphical user interface (Fig. 1, left) was developed which provides automation in the workflow between necessary software elements. As an example, after input of the images Bundler and PMVS2 are executed automatically and the result is finally presented in MeshLab. MeshLab is an open-source, portable, and extensible system for the processing and editing of unstructured 3D triangular meshes developed at the Visual Computing Lab, which is an institute of the National Research Council of Italy in Pisa (CIGNONI et al. 2008).

2.2 VisualSfM

VisualSfM is a GUI application of multicore-accelerated SfM, which was developed at the University of Washington (WU 2007). The software is a re-implementation of the SfM system of the Photo Tourism Project and it includes improvements by integrating both SIFT on the graphics processing unit (Sift-GPU) and multicore bundle adjustment (WU 2011). The camera parameters are defined as follows. The focal lengths (in pixels) of the camera are automatically calculated according to EXIF data. The principal point for each image is assumed to be at image centre except when using a single fixed calibration and the software uses only one radial distortion value. Dense reconstruction can also be performed through VisualSfM using PMVS/CMVS (patch or cluster based multi view stereo software, FURUKAWA & PONCE 2010).

2.3 Microsoft Photosynth

Photosynth has been developed for the Photo Tourism Project in co-operation between Microsoft Live Labs and the University of Washington (SNAVELY et al. 2006). The program Bundler forms the basis for automatic generation of 3D point clouds by free data processing using an external web service. For the use of Microsoft Photosynth a program for uploading the photos to a server and a Windows Live ID, e.g. email address, is initially necessary (PHOTOSYNTH 2012). Depending upon the number of photos a result can be viewed in some seconds or a few minutes later online in all usual browsers; however no access to the data is possible. Only using the external program SynthExport from HAUSNER (2010), the computed 3D points and the camera parameters can be exported. However, the results correspond to those from Bundler. Nevertheless, POMASKA (2009) demonstrated how a photorealistic 3D model with true scale can be generated from imagery based on a low level polygon mesh and UV texture mapping using Photosynth for point cloud generation.

2.4 Autodesk Photofly/123D Catch Beta

In summer 2010 Autodesk introduced the project Photofly, a free web service, which allows the user to derive a meshed 3D model automatically from at least five overlapping photos of the recorded object (ABATE et al. 2011). The basis of Photofly is the program smart3D-capture from the French company acute3D in Nice. Photofly uses algorithms from computer vision and photogrammetry and the performance of cloud computing in order to provide 3D models efficiently from 2D imagery. The fundamental algorithms of this software are described by COURCHAY et al. (2010), while detailed information about the algorithms used are not available from Autodesk.

Photofly uses the "Autodesk Photo Scene Editor", which must be installed on the user's computer as a communication platform between users and server. The very clear user interface of this software transfers the selected photos to the server. Depending upon the ob-

ject complexity a 3D model will be provided for download within a short time period, i.e. usually in some minutes. This can be processed further within the software. Important functions in the software include selecting parts of the triangle meshes, navigation options, selecting of points and the definition of a reference distance for the absolute scaling of the model. Individual photos can be inserted into the model after the initial modelling by measurement of identical points (tie points). For the generation of 3D models three quality levels, mobile, standard and maximum (optimal result), are available. The results can be exported to different formats, e.g. OBJ or LAS. In November 2011 Photofly was replaced by 123D Catch Beta after the company acute3D has presented its software smart3D-capture to the public in October 2011. Detailed information about 123D Catch and related tutorials are available under 123D (2012).

3 Workflow

The general workflow for image-based 3D reconstruction using low-cost systems is illustrated in Fig. 2 to document the degree of automation of the individual procedures which is symbolised in colour (red = manual, yellow = interactive and green = automatic).

For photogrammetric object recording multiple photos are taken of the object from different positions, whereby coverage of com-

mon object parts should be available from at least three but preferably five photographs from different camera positions. After import of the images into the respective processing software the parameters for camera calibration (interior orientation) and (exterior) image orientations are automatically computed. The subsequent generation of 3D point clouds or 3D surface models is also carried out in full automatic mode. Only for the 3D transformation of the point cloud or the meshed model into a superordinate coordinate system must the user measure control points interactively. The derived 3D model is automatically textured using the original image data so that video sequences, e.g. in 123D Catch Beta, can be generated using these models. If a CAD model needs to be constructed from a transformed and geo-referenced, coloured 3D point cloud, manual processing has to be carried out in a CAD program, e.g. AutoCAD. This 3D CAD model can later be manually textured in visualisation software, e.g. 3D studio, Cinema4D, Maya, etc., using the digital photographs in order to produce visualisations and/or video sequences.

4 Results and 3D Comparisons

In this section the results of the applied software packages Microsoft Photosynth, Bundler/PMVS2, VisualSFM and Autodesk Photofly and/or 123D Catch Beta, respectively,

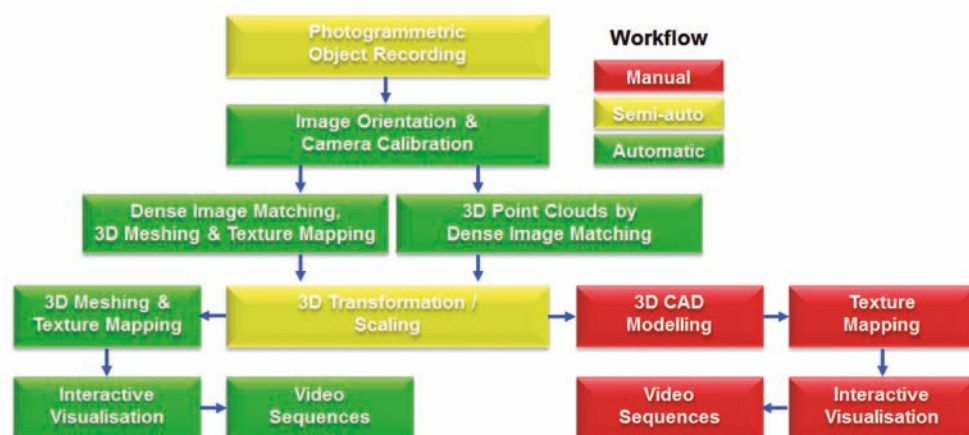


Fig. 2: Workflow for image-based low-cost 3D object reconstruction procedures.

Tab. 1: Statistics on different generated 3D objects using image-based systems, Pho. = photos.

Object	Camera/lens (mm)	Pixel	#Pho.	Software/service	# Points	# Triangle
Town house	Nikon D90 / 20	4288x2848	19	Photosynth	20,237	-
Town house	Nikon D90 / 20	4288x2848	19	Photofly	272,350	515,442
Town house	Nikon D90 / 20	4288x2848	19	Bundler/PMVS2	1,016,874	895,986
Fire House	Nikon D90 / 18	4288x2848	66	123D Catch	176,919	352,091
Fire House	Nikon D90 / 18	4288x2848	66	Bundler/PMVS2	1,541,924	-
Fire House	Nikon D90 / 18	4288x2848	66	VisualSFM	1,167,906	-
Zwinger	Nikon D90 / 28	4288x2848	15	Photosynth	18,553	-
Zwinger	Nikon D90 / 28	4288x2848	15	Photofly	155,697	285,669
Zwinger	Nikon D90 / 28	4288x2848	15	Bundler/PMVS2	917,965	-
Lion	Nikon D90 / 20	4288x2848	39	123D Catch	344,679	686,285
Lion	Nikon D90 / 20	4288x2848	39	Bundler/PMVS2	1,373,712	2,669,244
Moai Poike	Nikon D70 / 35	3008x2000	27	123D Catch	85,092	169,131
Moai Poike	Nikon D70 / 35	3008x2000	27	Bundler/PMVS2	629,644	-
Stone	Optio X, D70/80	diverse	48	123D Catch	-	291,613
Stone	Optio X, D70/80	diverse	48	Bundler/PMVS2	214,940	-
Pottery	Nikon D40 / 34	3008x2000	80	Bundler/PMVS2	-	323,402
Fragment	Nikon D90 / 24	4288x2848	58	VisualSFM	-	1,135,284

using the standard parameter values of each software package are presented for applications in architecture, cultural heritage and archaeology (Tab. 1), whereby individually generated datasets were compared with reference data from Zoller + Fröhlich's IMAGER 5006h and IMAGER 5010 terrestrial laser scanners (Tab. 2).

4.1 Applications in Architecture

Fig. 3 shows the results for the front façade of the Old Segeberger Town House (Bürgerhaus) – one of the oldest existing buildings in Schleswig-Holstein dated from the year 1539

with the front façade from 1606 – which are generated by Photosynth, Bundler/PMVS2 and Photofly. The 19 photographs used were acquired with a Nikon D90 (Nikkor 20 mm lens) from different positions as part of a student project at the HCU Hamburg. The result from Photosynth (20,237 points) is not suitable for façade modelling, while Photofly with 272,350 points and 515,442 triangles supplied the most attractive visual result. However, at the sides of the front of the façade and at the roof edges so-called virtual points, which do not exist in reality (Fig. 3, right), were meshed with Photofly. With Bundler/PMVS2 a dense point cloud of 1,016,874 points was generated (Fig. 3, centre right).

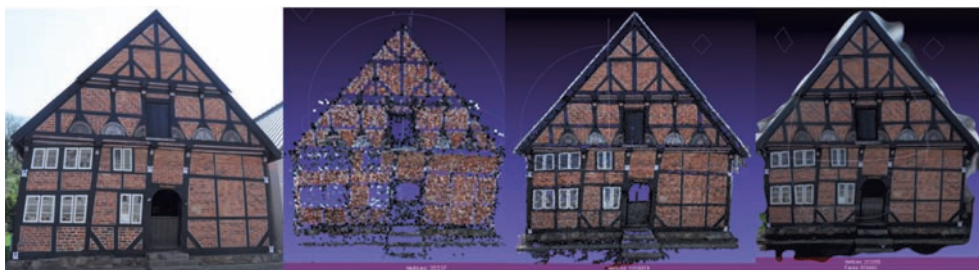


Fig. 3: Front façade of the old Town House (Bürgerhaus) in Bad Segeberg (19 photos from Nikon D90 with 20 mm lens); left: original photo; centre left: point cloud from Photosynth; centre right: Bundler/PMVS2; right: 3D meshing from Photofly.

The 3D meshing for the data from Bundler/PMVS2 of the front façade was carried out using Geo-magic Studio 12 and 2012. Geomagic Studio transforms 3D point clouds from range- or image-based systems and polygon meshes into accurate, usable 3D digital models for advanced product design, reverse engineering, custom manufacturing, CAD and analysis (GEOMAGIC 2012). The meshed 3D front façade of Bundler/PMVS2 (from 5 mm grid spacing) and Photofly is visualized in Fig. 4 in comparison with the reference data of the IMAGER 5006h. According to the technical specifications of the system manufacturer the range noise of this scanner (1 sigma) for unfiltered raw data at 25 m distance is 2.6 mm for a reflectivity of 10% (black), 1.5 mm for a reflectivity of 20% (dark grey), and 0.7 mm for

a reflectivity of 100% (white) using a scanning rate of 127,000 pixel/s (high power mode). Some areas at the black timber framework could not be measured with Bundler/PMVS2 or with the scanner thus small gaps are visible (Fig. 4, left). The triangle meshing of Photofly shows a noisy front with distinctive artefacts at the edges (Fig. 4, centre) while gaps were simply closed.

The absolute scaling of the data from Bundler/PMVS2 and Photofly was performed using measurements of two photogrammetric control points on the façade and the distance between them. Prior to 3D comparison both datasets were registered to the laser scanning data by an iterative closest point algorithm (ICP) (BESL & MCKAY 1992) in Geomagic. In the 3D comparison of the meshes from image-



Fig. 4: 3D meshing of the front façade from the Town House in Bad Segeberg; left: Bundler/PMVS2; centre: Photofly; right: IMAGER 5006h.



Fig. 5: Registration to the reference data of IMAGER 5006h (green < 3 mm); left: Bundler/PMVS2; right: Photofly.

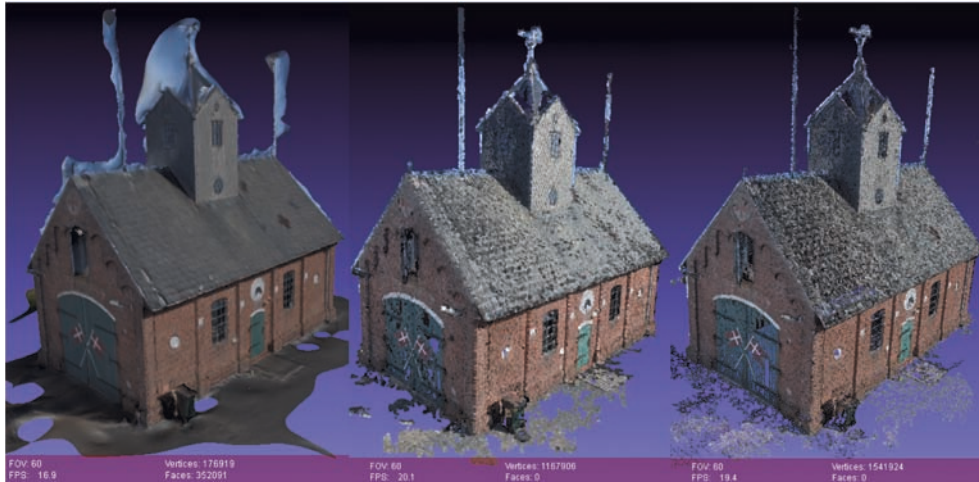


Fig. 6: Old Fire Brigade House located in the village Kirkeby of the Danish island Rømø; left: Meshed 3D model from 123D Catch Beta; centre: point cloud from VisualSFM; right: Bundler/PMVS2.

and range-based systems Bundler/PMVS2 clearly shows a better result than Photofly (Fig. 5) because most differences are smaller than 3 mm (see green areas). Due to the significantly higher number of 3D points obtained a geometrical better result was expected for Bundler/PMVS2 than for Photofly which is also documented in Tab. 2 through the lower number for the average deviation and the standard deviation.

In order to compare computation times an image block of 66 photographs with the Nikon D90 (Nikkor 18 mm lens) of the Old Fire Brigade House located in the village Kirkeby of the Danish island Rømø (Fig. 6) was computed with Bundler/PMVS2 and VisualSFM. The notebook used for processing consisted of an Intel Core i7 CPU Q740 processor with 1.73 GHz, an internal memory of 16 GB RAM running on the operating system Windows 7 Enterprise (64 bit), and a NVIDIA graphic card GeForce GT 445M. Computation time for Bundler/PMVS2 was 24 hours supplying 1,541,924 points, while the computing time of VisualSFM was only 42 minutes, which corresponds to a factor of 33 times faster than Bundler. However, approximately 374,000 points (24%) fewer were measured and these were particularly evident in the gaps within the shadow and roof areas (Fig. 6). Similar results (factor 24 faster, 16% fewer points)

were obtained with an image block of 44 images (Nikon D90, 20 mm lens) from the former Swedish toll house in the old harbour of the city of Wismar (KERSTEN et al. 2012). In a further test the meshed model of 123D Catch Beta was computed in 16 min using the web service. This result looked visually better than the other two but the edges are smoothed and there are some virtual (geometrically incorrect) points at the antennas and on the top roof areas.

4.2 Applications in Cultural Heritage

As an example of applications in cultural heritage documentation the results of a figure from the Zwinger palace in Dresden are illustrated in Fig. 7. The figure was acquired from two different heights in 15 photographs using a Nikon D90 with a Nikkor zoom lens (focal length 28 mm). Photofly could generate a visually-appealing, near-complete mesh with 285,669 triangles from 155,697 points (Fig. 7, left), while with Bundler/PMVS2, despite measuring 917,965 points, gaps were visible (Fig. 7, centre) and in Photosynth a very small point density was measured with only 18,553 points (Fig. 7, right). Unfortunately, no reference data was available for this figure mean-

ing that no geometrical analysis could be carried out.

The second example for applications in cultural heritage documentation is the 3D comparison of different results for the lion figure at the entrance of the imperial church (Kaiserdom) in Königlutter as illustrated in Figs. 9 and 10. The lion was acquired by image and range-based methods, i.e. in 39 photographs from different heights around the object using a Nikon D90 with a Nikkor lens (focal length 20 mm) and from two close scan stations using the laser scanner IMAGER 5006h. 123D Catch Beta could generate a visually appealing, almost complete meshed model with 686,285 triangles from 344,679 points (Fig. 8, top left), while with Bundler/PMVS2 despite 2,433,077 points, computed in 9 hours and 51 minutes (15 min per photo), some gaps are visible (Fig. 9, bottom left). The two registered clouds of the laser scanner which do not represent full coverage of the lion, were reduced to 660,000 points in total with a grid spacing of 2 mm due to the huge data volumes, which yielded a meshed model of 1,314,603 triangles. The 3D comparison of the meshed models from Bundler/PMVS2, also reduced to 2 mm grid spacing, and from 123D Catch Beta with the reference data was carried out in Geomagic after ICP registration of each model to the

reference data. The results in Figs. 9 and 10 indicate deviations of ± 2 mm to the reference for the most parts of the meshed models of the figure, while the average deviations are in the range of ± 20 mm (Tab. 2) due to higher deviations at the wall and on the ground. The 3D comparison of 123D Catch Beta vs. IMAGER 5006h shows higher deviations especially in areas with higher curvature and edges due to smoothing effects, while the comparison of Bundler/PMVS2 vs. IMAGER 5006h demonstrates some systematic deviations on the front part of the lion.

4.3 Applications in Archaeology

Photofly and/or 123D Catch Beta could generate 3D models that are quite attractive visually when the archaeological objects are small and relatively rotund. A moai at the volcano crater Poike on Easter Island (Chile) was acquired in 27 surrounding photos with a Nikon D70 (Nikkor zoom lens with 35 mm). The result from 123D Catch Beta provided an almost-complete, textured 3D model (Fig. 10) with 169,131 triangles (from 85,092 points) while with Bundler/PMVS2 despite measurement of nearly 630,000 points, some gaps at the neck and at the bottom of the figure were visible.



Fig. 7: Figure in the Zwinger palace of Dresden; left: Autodesk Photofly; centre: Bundler/PMVS2; right: Microsoft Photosynth.

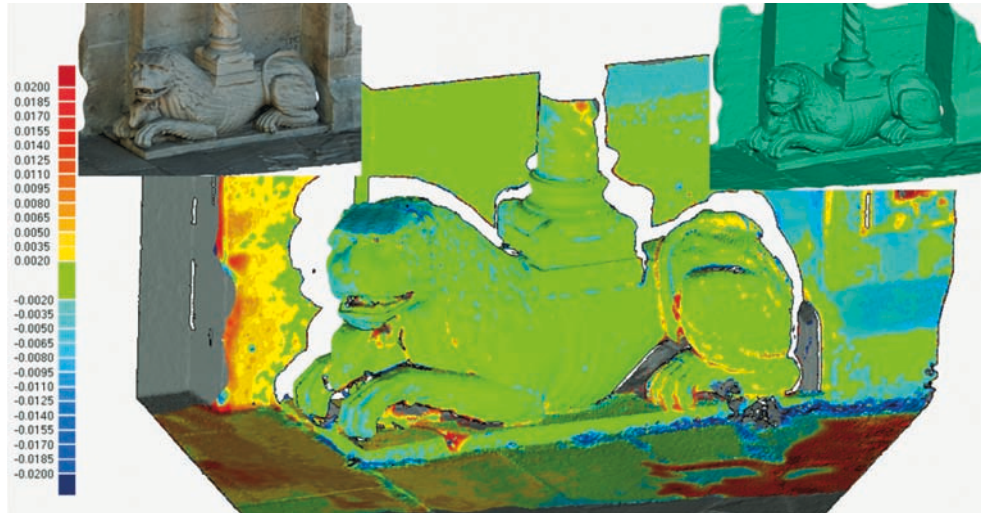


Fig. 8: 3D comparison of the lion figure at the imperial church in Königslutter between the 3D models from 123D Catch Beta and IMAGER 5006; top left: 3D model with texture; top right: without texture from 123D Catch Beta (green < 2 mm).



Fig. 9: 3D comparison of the lion figure at the imperial church in Königslutter between the 3D models from Bundler/PMVS2 and IMAGER 5006; bottom left: point cloud from Bundler/PMVS2; bottom centre: IMAGER 5006h; bottom right: meshed 3D model from the IMAGER 5006h (green < 2 mm).

A geometrical accuracy analysis of this data could not be carried out due to the absence of reference data.

A 3D model of the rear of a moai eye, carved from Obsidian stone, could only be

successfully generated using 123D Catch Beta, because both laser scanner IMAGER 5006i and Bundler/PMVS2 could only measure very noisy point clouds with each including some gaps (Fig. 11). For measurements



Fig. 10: Small moai (height 0.7 m) at Poike on Easter Island (Chile); left: measured points; centre left: 3D meshing; centre right: textured 3D model in each case from 123D Catch Beta; right: dense coloured point cloud measured with Bundler/PMVS2 identifying some gaps (white ellipses).

with 123D Catch Beta and Bundler/PMVS2 image data from the following cameras were used: a) 27 photos from the Pentax Optio X (2560 x 1920 pixel) with 10 mm focal length, b) ten photos from a Nikon D70 (3008 x 2000 pixel) with a focal length of approx. 40 mm, and c) eleven photos from a Nikon D80 (3872 x 2592 pixel) with a focal length of 50 mm. The textured 3D model of the moai eye generated with 123D Catch Beta consists of 291,613 triangles (Fig. 11, right), while in total only 214,940 points were measured with Bundler/PMVS2 and only 95,820 points were scanned with the IMAGER 5006i. Although 3D comparison with reference data could not be conducted for accuracy analysis, subjective comparison of the provided 3D model suggests that it corresponds very well to the original. The model could not be scaled as no metric information was available.

For the next two examples (pottery/ceramic and architectural fragment from Yeha/Ethiopia) reference data were available. The pottery (ceramic(s)) was acquired by camera and laser scanner in order to compare image-based and range-based object recording. The pottery (Fig. 12) was photographed in the upper part with 50 photos and in the lower part with 30 photos using a Nikon D40 (Nikkor zoom lens, focal length 34 mm). With the terrestrial laser scanner IMAGER 5006h nine scans were required to achieve complete recording of the object. The triangle meshing of the pottery (approx. 160,590 triangles) was computed using the registered scans in Geomagic. The image data was processed with Bundler/PMVS2 using a reduced image resolution of 2400 pixels, i.e. a point cloud was separately generated

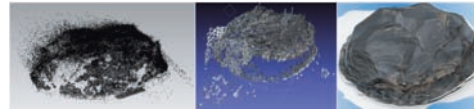


Fig. 11: Black Obsidian stone as the rear of a moai eye at Easter Island; left: point cloud from IMAGER 5006i; centre: from Bundler/PMVS2; right: meshed 3D model from 123D Catch Beta.

for the upper and lower object part (Fig. 12). Using the measuring scale (10 cm), which was additionally placed into object space for the photographs, the scaling of the two datasets could be carried out. Firstly, the upper and lower 3D point clouds were registered using ICP algorithm. Secondly the 3D model was generated using the common point cloud with 0.5 mm grid spacing. Finally, a 3D comparison between model and reference was computed in Geomagic. This showed that differences larger than 1 mm only occurred at the boundary regions and in those areas with large curvatures (Fig. 12). These differences can be explained by the higher resolution of the imagery compared to the more smoothed scan data. The average deviation between image-based and range-based 3D model is 1 mm, while the standard deviation is 1.4 mm (Tab. 2).

Another archaeological finds from the excavation in Yeha (Ethiopia) was an architectural fragment which was photographed in two image blocks using a Nikon D90 (Nikkor zoom lens 24 mm): 33 photos (back side) and 25 photos (front side). A small scale bar was placed into object space for image acquisition thus facilitating scaling of the two datasets during processing. The image data was processed with VisualSFM using the full image resolution of the photographs for each image block producing two point clouds (595,933 points in total with grid spacing of 1 mm). After registration of the two point clouds with ICP algorithm a combined meshed 3D model (approximately 1,135,284 triangles in total) was computed (Fig. 13 left in each case).

As a reference, the object was scanned with the IMAGER 5010 from nine scan stations. According to the technical specifications of the system manufacturer the IMAGER 5010 has improved range noise behaviour. Range noise of this scanner (1 sigma) for unfiltered



Fig. 12: Left: Photograph of the pottery from Yeha (Ethiopia) with the measuring stick for object scaling; centre left: composing the pottery from Bundler/PMVS2; centre right: meshed and smoothed 3D model of the pottery from IMAGER 5006h; right: result of 3D comparison in Geomagic Studio 12 (green < 1 mm).

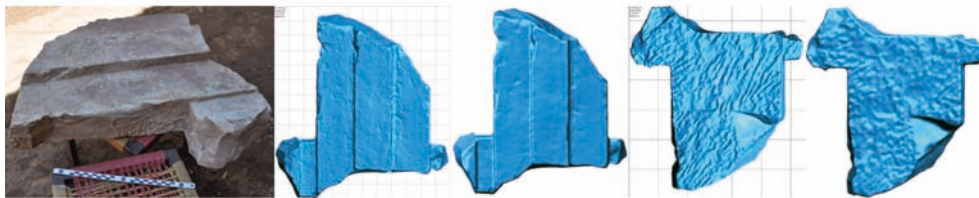


Fig. 13: Architectural fragment (archaeological find) in Yeha (Ethiopia): from left to right: photograph with scale bar; meshed 3D model of front (VisualSFM); meshed 3D model of front (IMAGER 5010); rear (VisualSFM); rear (IMAGER 5010).

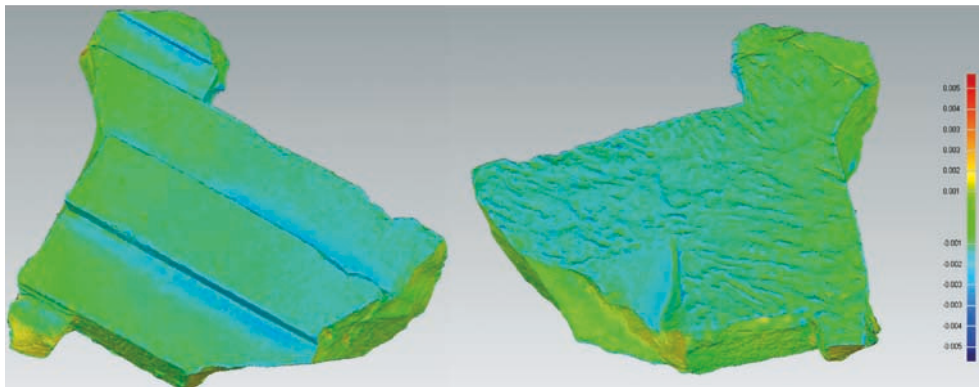


Fig. 14: Deviation between 3D model of the architectural fragment to reference data of the IMAGER 5010 illustrated in Geomagic Studio 2012 (green < 1 mm).

raw data at 10 m distance is 0.5 mm for a reflectivity of 14% (black), 0.4 mm for a reflectivity of 37% (dark grey), and 0.3 mm for a reflectivity of 80% (white). The registered point cloud (2,072,781 points) was filtered and reduced in Geomagic to a regular point distance of 2 mm, resulting in a mesh of approximately 1,120,580 triangles (Fig. 13). First the scan data was slightly smoothed using a noise filter. After ICP registration of the meshed model from image-based data with the meshed model from laser scanning a 3D comparison was

performed in Geomagic producing the results of the front and rear sides of the fragment presented in Fig. 14. Differences from the image-based data to the reference, which are below 1 mm in the average (Tab. 2), are depicted in green. This comparison demonstrated that the dataset corresponds most closely to the result from laser scanning in the range of ± 1 mm. Since the image data obviously supplied more details with a higher resolution than the smoothed scanning data in this case study (Fig. 14), these comparisons should primarily

Tab. 2: Comparison of image-based measurement (Geomagic Studio) and terrestrial laser scanning measurement (reference data); dev. = deviation, av. = average, std. = standard; (mm).

Object	Software/Criterion	# meshes	Max. dev.	Av. dev.+	Av. dev.-	Std. dev.
Town house	Photofly	504,449	530.0	36.6	-17.9	77.1
Town house	Bundler/PMVS2	895,986	517.0	7.5	-4.2	18.0
Lion	123D Catch Beta	686,285	153.0	18.7	-18.4	38.3
Lion	Bundler/PMVS2	2,669,244	153.0	14.9	-13.2	32.2
Pottery	Bundler/PMVS2	323,402	8.0	0.9	-1.0	1.4
Fragment	VisualSFM	1,135,284	-4.7	0.6	-0.8	0.8

detect gross errors in the models, which obviously did not arise here. A fringe projection (structured light) system could supply more precise reference data with higher resolution, but such a system was not available in Yeha/Ethiopia at that time. However, an average deviation of better than 0.3 mm in the 3D comparison between a 3D model of a similar fragment generated from images and scanned with a fringe projection system Breuckmann OptoTOP-HE confirmed the good results of these image-based systems (KERSTEN & LINDSTAEDT 2012).

5 Conclusion and Outlook

In this contribution economical, image-based recording and modelling procedures, which are able to generate precise and detailed 3D surface models from terrestrial photographs for applications in architecture, cultural heritage and archaeology, were presented. The quality of results from image-based systems depends on the number of images used, the image resolution, photo scale, illumination conditions and the parameter settings of the software applied. The results from some software packages, e.g. Bundler/PMVS2, using images from SLR digital cameras and standard parameter settings in the software are comparable with results from expensive terrestrial laser scanners. Object recording with cameras is simple, very fast, very flexible and economical. The entire procedure is to a large extent automated and works even without targets as control points. Objects can be scaled through the inclusion of a single scale bar in object space. The results presented here show that the open-source software Bundler/

PMVS2, VisualSFM and the web service Photofly and/or 123D Catch Beta can generate equivalent 3D models when compared with terrestrial laser scanners, although the exact results depend upon the size and shape of the objects. However, the reliability of the image-based systems requires improvement because some of the achieved results were geometrically unusable. Depending upon object material and lighting conditions, noisy point clouds were sometimes produced with Bundler/PMVS2. Photofly/123D Catch Beta showed results that were visually very attractive (smoothed – whereby small holes are automatically filled by the software) when used on small and roundish objects. These results could fulfill the requirements of many users for visualisation in the Internet. However, the results from Photosynth are not useful for 3D modelling since the point density is too small. Nevertheless, further investigations with other more precise recording procedures such as fringe projection (structured light) or close-range scanners are necessary for small objects in order to be able to provide verified statements about the geometrical quality. Furthermore, CAD modelling with image-based 3D point clouds such as presented by KERSTEN et al. (2004), KERSTEN (2006) and KERSTEN (2007) should be investigated in the future to evaluate the potential of this automatically generated data.

These investigations have shown that Bundler/PMVS2 was more efficient than Photofly/123D Catch Beta for larger objects although the computation times were substantially longer. The significantly shorter processing time with the web service implies that Autodesk makes plentifully computing resources available for this service. Due to the

optional use of these web services the resources of the user's own computer could be preserved, and a time-saving is achieved relative to the computation on a local PC. However, the availability of a fast Internet connection is not guaranteed everywhere in the world, particularly at the locations of many archaeological expeditions, meaning that the operation of open-source software on a user's own PC has an advantage. Furthermore, issues relating to data privacy should not be neglected when using web services.

Due to the sensible combination of computer vision algorithms and photogrammetric procedures the workflow from object recording, through 3D modelling to visualization has become increasingly automated without significantly neglecting geometrical accuracy. These combined procedures are only at the beginning of their development, since the speed of such algorithms can be significantly increased by future implementation of the software on graphics processor units (GPU) and because the mutual integration of both procedures can still be substantially optimized. A large number of algorithms for pixel-based matching in stereo or multi-view photographs with different performance potential from the field of computer vision are also available (SCHARSTEIN & SZELISKI 2009) and have yet to be applied to this field. However, the level of automation is so high that many solutions are black-boxes with poor repeatability and low reliability. REMONDINO et al. (2012) present an investigation of automated image orientation packages in order to clarify potentialities and performances (including for camera calibration) when dealing with large and complex datasets. Their results demonstrate that, in case of complex and long sequences, SfM methods suffer of reliability and repeatability.

The dominant market position for the last 10 years of airborne and terrestrial laser scanning as tools for extensive data acquisition is being challenged by efficient photogrammetric procedures supported by computer vision algorithms and improved computer technology.

Acknowledgements

The authors would like to gratefully acknowledge the support of KAY ZOBEL (HafenCity University Hamburg) for developing the customised graphical user interface of Bundler/PMVS2 and MeshLab (Fig. 1), which provided an automatic workflow for the software.

References

- 123D, 2012: <http://www.123dapp.com/catch/> (3.9.2012).
- ABATE, D., FURINI, G., MIGLIORI, S. & PIERATTINI, S., 2011: Project Photofly: New 3D Modelling Online WEB Service. – *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (5/W16), http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W16/pdf/abate_etal.pdf (4.9.2012).
- BARAZZETTI, L., REMONDINO, F. & SCAIONI, M., 2009: Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects. – *SPIE Optics+Photonics*, 7447, 2–3 August, San Diego, CA, USA.
- BARTHELSEN, J., MAYER, H., HIRSCHMÜLLER, H., KUHN, A. & MICHELINI, M., 2012: Orientation and Dense Reconstruction from Unordered Wide Baseline Image Sets. – *PFG* **2012** (4): 421–432.
- BESL, P. & MCKAY, N., 1992: A Method for Registration of 3-D Shapes. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* **14** (2): 239–256.
- CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F. & RANZUGLIA, G., 2008: MeshLab: an open-source mesh processing tool. – SCARANO, V., DE CHIARA, R. & ERRA, U. (eds.): *Eurographics Italian Chapter Conference*, The Eurographics Association: 129–136.
- COURCHAY, J., PONS, J.-P., MONASSE, P. & KERIVEN, R., 2010: Dense and Accurate Spatio-temporal Multi-view Stereovision. – *Computer Vision – ACCV 2009, Lecture Notes in Computer Science* **5995**: 11–22.
- FURUKAWA, Y. & PONCE, J., 2010: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **32** (8): 1362–1376.
- GEOMAGIC, 2012: <http://www.geomagic.com> (3.9.2012).
- HAUSNER, C., 2010: SynthExport. <http://synthexport.codeplex.com/> (4.1.2012).

- KERSTEN, TH., 2006: Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications. – IOANNIDES, M., ARNOLD, D., NICCOLUCCI, F. & MANIA, K. (eds.): 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2006: 207–214.
- KERSTEN, TH., 2007: Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/ Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. – International Journal of Architectural Computing, Special Focus on Cultural Heritage **02** (05): 339–354, Multiscience.
- KERSTEN, TH., ACEVEDO PARDO, C. & LINDSTAEDT, M., 2004: 3D Acquisition, Modelling and Visualization of north German Castles by Digital Architectural Photogrammetry. – Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35** (5): 126–132.
- KERSTEN, TH. & LINDSTAEDT, M., 2012: Image-Based Low Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. – EuroMed 2012 – Int. Conference on Cultural Heritage. – IOANNIDES, M., FRITSCH, D., LEISSNER, J., DAVIES, R., REMONDINO, F. & CAFFO, R. (eds.). – Lecture Notes in Computer Science (LNCS) **7616**: 1–10, Springer.
- KERSTEN, TH., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K., 2012: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. – SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. **21**: 137–148, DGPF, Potsdam, CD-ROM.
- LOURAKIS, M.I.A. & ARGYROS, A.A., 2004: Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. – Institute of Computer Science, FORTH-ICS, Tech. Rep. **340**, Heraklion, Greece, <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba> (4.9.2012).
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. – International Journal of Computer Vision **60** (2): 91–110.
- PHOTOSYNTH, 2012: <http://photosynth.net/> (4.9.2012).
- POMASKA, G., 2009: Utilization of Photosynth Point Clouds for 3D Object Reconstruction. – **22nd** CIPA Symposium, Kyoto, Japan, <http://cipa.icosmos.org/fileadmin/template/doc/KYOTO/34.pdf> (4.9.2012).
- REMONDINO, F. & MENNA, F., 2008: Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. – Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (B5-1): 199–206.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S.F., GRÜN, A. & ZHANG, L., 2008: Turning images into 3-D models. – IEEE Signal Processing Magazine **25** (4): 55–65.
- REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, TH. & TROISI, S., 2012: Low-cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – a Critical Overview. – EuroMed 2012 – Int. Conference on Cultural Heritage. – IOANNIDES, M., FRITSCH, D., LEISSNER, J., DAVIES, R., REMONDINO, F. & CAFFO, R. (eds.). – Lecture Notes in Computer Science (LNCS) **7616**: 40–54, Springer.
- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2009: Middlebury Stereo Vision Page. <http://vision.middlebury.edu/stereo/> (7.1.2012).
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2006: Photo tourism: exploring photo collections in 3D. – ACM Transactions on Graphics **25** (3): 835–846.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2008: Modeling the World from Internet Photo Collections. – International Journal of Computer Vision **80** (2): 189–210.
- WU, C., 2007: SiftGPU: A GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT). <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu> (4.9.2012).
- WU, C., 2011: VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. <http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/> (4.9.2012).

Address of the authors:

THOMAS P. KERSTEN and MAREN LINDSTAEDT, Hafen-City Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Hebebrandstraße 1, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5343, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: {thomas.kersten}{maren.lindstaedt}@hcu-hamburg.de

Manuskript eingereicht: April 2012
Angenommen: August 2012

6. Fazit und Ausblick

3D-Punktwolken beeinflussen seit den 1990er Jahren zunehmend den beruflichen Alltag der Vermessung, wenn es um die 3D-Erfassung und Modellierung von Objekten geht. So hat sich ein Paradigmenwechsel von der punktförmigen zur flächenhaften Vermessung von Objekten durch Punktwolken vollzogen. Dementsprechend haben sich u.a. Messinstrumente, wie Tachymeter und Totalstationen, auch in die Richtung langsam scannender Systeme weiterentwickelt. Sie können somit im Fall kleinerer Flächen für eine flächenhafte Erfassung durch Punktwolken mit einer geringeren Effizienz als Laserscanner genutzt werden. Viele Messsysteme, wie luftgestützte Laserscanner, terrestrische Laserscanner, handgeführte 3D-Scanner, bildbasierte Aufnahmesysteme auf der Grundlage digitaler Spiegelreflex- und Systemkameras, Time-of-Flight-Kameras sowie Streifenprojektionssysteme, liefern heute bei der Objekterfassung die erforderlichen dichten Punktwolken mit variierenden Genauigkeiten. Oft sind diese Punktwolken je nach eingesetztem Messsystem mit Zusatzinformationen, wie Intensität und RGB-Werte je 3D-Punkt, versehen.

In der vorliegenden Arbeit werden vorrangig 3D-Punktwolken, die durch statische (ortsfeste) und kinematische Laserscanner sowie alternativ durch bildbasierte Aufnahmeverfahren mit Kameras erfasst wurden, evaluiert. Während der Anwender bei der photogrammetrischen Aufnahme mit digitalen Kameras das Messsystem „on-the-job“ anhand einer geeigneten Aufnahmekonfiguration sowie der erfassten Bilddaten kalibrieren kann (muss), werden terrestrische Laserscanner dem Anwender vom Systemhersteller kalibriert zur Verfügung gestellt. Damit übernimmt der Anwender das kalibrierte System als Black Box, d. h. er muss den Genauigkeitsangaben der Systemanbieter in den technischen Spezifikationen vertrauen und hat oft keine Möglichkeit, diese Informationen im Detail zu überprüfen. Im universitären Bereich wurden bereits Lösungen für die Selbstkalibrierung von terrestrischen Laserscannern entwickelt (Schneider 2009), die jedoch kommerziell (noch) nicht verfügbar sind. Seit den frühen 2000er Jahren haben verschiedene Hochschulen Prüfverfahren und Kenngrößen entwickelt, um die jeweils auf dem Markt verfügbaren terrestrischen Laserscanner „auf Herz und Nieren“ zu prüfen, die Leistungsfähigkeit der Scanner für spezifische Aufgaben zu verifizieren und sie mit ihren Stärken und Schwächen kennen zu lernen. Allerdings gibt es bis heute keine Standards, um terrestrische Laserscanner und auch handgeführte 3D-Scanner zu untersuchen, da jede Hochschule ihre eigenen Prüfverfahren entwickelt hat. Dadurch fällt ein Vergleich der Ergebnisse eher schwer, wenn nicht in den Untersuchungen die Kenngrößen der VDI/VDE Richtlinie 2634 (Blatt 2 und 3) verwendet werden, die für bildgebende Messsysteme mit flächenhafter Antastung entwickelt wurde.

In dem ersten Artikel (Kap. 2.1) „**Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems**“ wurden verschiedene Verfahren für Genauigkeitsuntersuchungen terrestrischer Laserscanner an der HafenCity Universität Hamburg vorgestellt. Zwar wurden in den Jahren von 2004 bis 2012 viele verschiedene Scanner mit den in diesem Artikel vorgestellten Prüfverfahren untersucht, doch kann daraus keine allgemein gültige Aussage über die Genauigkeit der jeweiligen Scannerserie abgeleitet werden, da sich die Ergebnisse nur auf den jeweilig untersuchten Scanner beziehen. Andere Geräte aus der gleichen Produktserie können durchaus abweichende Ergebnisse erzielen. Die wesentlichen Erkenntnisse, die aus den verschiedenen Scanneruntersuchungen über die verschiedenen Jahre gezogen werden können, sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die Genauigkeitsangaben in den technischen Spezifikationen der Systemhersteller wurden durch die Ergebnisse der Untersuchungen in der Regel eingehalten.
- Je nach Scanner, Messverfahren und Scandistanz werden Genauigkeiten von 1 bis 10 Millimeter für eine Streckenmessung terrestrischer Laserscanner erreicht.

- Die Wiederholungsmessungen mit denselben Instrumenten bestätigen in den Untersuchungen die vorherigen Ergebnisse. Die Ergebnisse baugleicher Instrumente (z. B. Scannertyp IMAGER 5006 und HDS 6000) befanden sich immer im gleichen Genauigkeitsniveau.
- Die entwickelten Prüfverfahren konnten nicht durchgängig an die technischen Spezifikationen und der Leistungsfähigkeit der untersuchten Scanner (z. B. Messvolumen, Reichweite, etc.) angepasst werden. Da die Untersuchungen oft unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, konnten nicht immer realitätsnahe und praktische Untersuchungsbedingungen geschaffen werden.
- Die terrestrischen Laserscanner wurden im Laufe der Jahre bzw. im Zuge der technischen Weiterentwicklungen immer genauer, so dass die entwickelten Prüfverfahren dem erreichten Genauigkeitsniveau der Scanner nicht mehr standhalten konnten (siehe dazu auch Lindstaedt et al. 2012). Gerade die Untersuchungen in einem 3D-Testfeld wurden zunehmend schwieriger, da sich die exakten Positionen der Zielzeichen (Kugel, schwarz-weiß Tafel oder Reflexfolie) wegen des Offsets zum Prisma der Tachymetermessungen nicht mehr mit erforderlicher Präzision bestimmen ließen. Stabile Zielzeichen, die im Austausch mit Kugelprismen den Offset konstant halten und eine exakte Lasertrackermessung als Referenz ermöglichen, sind zukünftig die ideale Lösung.

Welche Konsequenzen können aus den vorliegenden geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen gezogen werden:


- Die in verschiedenen Publikationen vorgeschlagenen Kenngrößen (z. B. Heister 2006; Kern 2008) machen es zwar einfacher, Untersuchungsergebnisse miteinander zu vergleichen, doch sollten die Hochschulen darauf achten, dass die Verfahren und Ergebnisse der Scanneruntersuchungen nicht nur akademisch, sondern auch praxistauglich dargestellt werden, damit sie vom Anwender in der Praxis genutzt werden können.
- Die VDI/VDE Richtlinie 2634 bildet mit ihren Blättern 2 und 3 eine wichtige Grundlage, um mit den Kenngrößen Antastabweichung, Kugelabstandsabweichung und Längenmessabweichung als einheitliche Standards zu arbeiten.
- Es wäre wünschenswert, wenn von den Systemherstellern vergleichbare technische Spezifikationen der terrestrische Laserscanner insbesondere für die Genauigkeit (3D-Punkt, Distanz und Fläche) veröffentlicht werden.
- Es wäre wünschenswert, wenn von den Systemherstellern vergleichbare Kalibrierungszertifikate für ihre ausgelieferten terrestrischen Laserscanner zur Verfügung gestellt werden.
- Als wichtige Voraussetzung für eine qualitativ gute Projektbearbeitung muss der Anwender überprüfen können, ob eine korrekte und aktuelle Systemkalibrierung für den ausgelieferten und eingesetzten Scanner auf dem Instrument aufgespielt wurde.
- Der Anwender muss außerdem mit minimalem Zeitaufwand überprüfen können, ob der Scanner die für die Projektspezifikation zu erreichende Genauigkeit erfüllen kann.
- Das DVW Merkblatt, 7-2014 über die „Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)“ (Neitzel & Gordon 2013; Neitzel et al. 2014) ist eine konsequente Entwicklung aus den vielen vorgeschlagenen Prüfverfahren, insbesondere von Gottwald (2008) und Gottwald et al. (2009). Allerdings gibt es noch keine Publikationen über praktische Erfahrungen mit den in dem DVW Merkblatt vorgeschlagenen Feldprüfverfahren. Daher ist nicht geklärt, ob diese Feldprüfverfahren bisher erfolgreich eingesetzt werden.
- Die technischen Entwicklungen der terrestrischen Laserscanner haben in dem letzten Jahrzehnt dazu geführt, dass die Instrumente immer schneller, weiter und genauer messen können und sie zeitgleich kleiner, leichter, kompakter und autarker werden. Zusätzlich werden heute verschiedene Sensoren (u. a. Kamera, GNSS, Inertial Measurement Unit, etc.) in das

scannende System integriert, die den Scanner letztlich zu einem Multi-Sensor System erweitern.

- Die unterschiedlichen Materialien und Oberflächeneigenschaften der zu scannenden Objekte stellen heute immer noch eine Herausforderung für die verschiedenen Scanner dar, da sie immer noch heterogene Ergebnisse verursachen können. Neue stochastische Modelle können solche Einflüsse erfassen und Einflüsse, die durch die Objektdistanz, den Auftreffwinkel des Laserstrahls sowie die radiometrischen Eigenschaften einer Oberfläche hervorgerufen werden, berücksichtigen. Erste Untersuchungen, um eine zutreffende Beschreibung der stochastischen Eigenschaften für reflektorlose Distanzmesser zu entwickeln, zeigen bereits in intensitätsbasierten stochastischen Modellen vielversprechende Resultate (Wujanz et al. 2017a; Wujanz et al. 2017b; Lambertus et al. 2017; Erić et al. 2017).

Eine Betrachtung neuester technischer Entwicklungen beim terrestrischen Laserscanning zeigt, dass die Zukunft schon längst begonnen hat bzw. ein nächster entscheidender Schritt im Instrumentenbau vollzogen wurde. Die CAD-Firma Autodesk und der geodätische Systemhersteller Leica Geosystems haben den neuen Leica BLK360 Laserscanner entwickelt und im Markt platziert. Es ist der leichteste und kleinste Laserscanner der Welt, der zu einem sehr attraktiven Preis von derzeit \$ 15.990 vertrieben wird. Wenn das Instrument die technischen Spezifikationen im praktischen Einsatz erfüllen kann, dann wird er für viele Anwendungen im Bereich Building Information Modelling in Frage kommen und somit eine kostengünstige Option für viele Ingenieurbüros darstellen, da insbesondere die Reichweite von bis zu 60 m für einen Großteil der Anwendungen ausreichen wird. In Tabelle 6.1. sind die wesentlichen technischen Spezifikationen des Leica BLK360 Laserscanners zusammengestellt.

Tab. 6.1. Technische Spezifikationen des Leica BLK360 Laser Scanner (Leica Geosystems AG, 2017)

	Größe	165 mm hoch x 100 mm Durchmesser
	Gewicht	1 kg
	Sensoren	15 MPix Kamera mit HDR + Thermalkamera
	Laserklasse	1 (gemäß EC 60825-1:2014)
	Messgenauigkeit	ca. 4mm @ 10 m / 7 mm @ 20 m
	3D Punktgenauigkeit	6 mm @ 10m / 8 mm @ 20m
	Reichweite	min. 0.6 m bis max. 60 m
	Sichtfeld	360° (horizontal) / 300° (vertikal)
	Scanrate	bis zu 360'000 Punkte / Sekunde
	Wellenlänge	830 nm
	Steuerung	iPad über WiFi Modus

Mit der geringen Baugröße und dem leichten Gewicht liegt der BLK360 schon im Bereich der handgeführten 3D-Scanner. Allerdings ist er mit einer 3D-Punktgenauigkeit von 6-8mm und einer Reichweite von 60 m (siehe Tab. 6.1.) für andere Anwendungen konzipiert. Die Genauigkeit einiger 3D-Handscanner, die bei einer deutlich kürzeren Reichweite von maximal 5 m unter 1 mm liegt, wird das Gerät bei weitem nicht erreichen.

In dem zweiten Artikel (Kap. 2.2) „**Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems**“ wurden Genauigkeitsuntersuchungen von 3D-Handscannern anhand verschiedener Referenz- und Testkörper an der HafenCity Universität Hamburg vorgestellt, um als Fortsetzung zu den Untersuchungen der terrestrischen Laserscanner auch die Systeme zu verifizieren, die teilweise als deren Ergänzung betrachtet werden. Bisher wurden keine Ergebnisse über andere Untersuchungen von 3D-Handscannern veröffentlicht. Im Folgenden sind die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen daraus zusammengefasst.

- Die evaluierten Systeme konnten bis auf eine Ausnahme die Genauigkeiten und die Qualität der Referenzdaten aus Messungen von High-End Streifenprojektionssystemen (Genauigkeitsniveau bei ca. 10-30 Mikrometer) aktuell nicht erreichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle verwendeten Referenz- und Testkörper dem (jeweils typischen) Anwendungsspektrum der getesteten 3D-Scanner optimal entsprachen.
- Als einzige Ausnahme konnte der Creaform HandySCAN 700 als high-end Messsystem sehr nahe an die Ergebnisse der Referenzsysteme heranreichen, womit das System als portabler und flexibler 3D-Scanner fast die gleiche Genauigkeit wie die statischen Streifenprojektionssysteme erreicht.
- Die kontinuierliche Aufnahme durch langsame, gleichförmige Bewegungen – um und über dem Aufnahmeobjekt – erfordert eine entsprechende Erfahrung seitens der Anwender, damit es nicht zum Signalabriss kommt, der in einigen Fällen einen Neustart der Messung nötig macht.
- Die in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, ermittelten Kenngrößen (Anast- und Kugelabstandsabweichungen) zeigen auf, dass bei einigen Handscannern der Geräte-Maßstab nicht exakt kalibriert wurde oder auf Grund eines mechanisch zu wenig soliden Aufbaus des Sensors möglicherweise nicht langzeit-stabil ist.
- Zwei im höheren Preissegment angesiedelten Systeme, Mantis F5 SR und Artec Spider, konnten die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten bei den Untersuchungen mit den Referenzkörpern Testy, Radnabe und Einstein-Büste nicht einhalten. Im Nachgang der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass beide Systeme nicht korrekt kalibriert waren. Wiederholungsmessungen im kalibrierten Zustand fanden im August 2017 an der HCU Hamburg statt.
- Eine kurze Kalibrierungsprozedur ist für jeden Handscanner vor jedem Messeinsatz empfehlenswert. Zumindest muss die Genauigkeit des einzusetzenden Messsystems effizient überprüft werden können. Die Systemhersteller müssen diese Anforderungen zur Qualitätssicherung zukünftig berücksichtigen und entsprechende Verfahren dafür zur Verfügung stellen.

Obwohl einige handgeführte Systeme, wie z. B. von Creaform, schon länger im Markt verfügbar sind, steht die Entwicklung der 3D-Handscanner nach Auffassung des Verfassers erst am Anfang, da zunehmend weitere Systemhersteller mit neuen Systemen, wie z. B. die Metrology-Scanner und handgeführten 3D-Scanner von Shining 3D (<http://en.shining3d.com/>), in den Markt drängen. Es wird erwartet, dass 3D-Handscanner in Zukunft robuster, schneller, genauer und kostengünstiger werden, da sie in vielen Anwendungen auch in Konkurrenz zu bildbasierten Aufnahmesystemen, wie digitale Kameras stehen, die mit den entsprechenden Auswertelgorithmen sehr dichte Punktwolken der aufgenommenen Objekte mit ähnlichen oder sogar besseren Genauigkeiten liefern können (siehe auch Kap. 5).

Die Untersuchungen terrestrischer Laserscanner und handgeführter 3D-Scanner haben gezeigt, dass diese geometrischen Untersuchungen erforderlich sind, um das Leistungspotential der Messsysteme besser beurteilen und Fehler im Systemzustand entdecken zu können.

In dem dritten Artikel (Kap. 3.1) „**Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications**“ wurde die Verwendung von 3D-Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning in Kombination mit einer photogrammetrischen Auswertung zur 3D-CAD-Rekonstruktion eines historischen Bauwerkes am Beispiel des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen vorgestellt. Der im diesem Beitrag eingesetzte Laserscanner Mensi GS100 war Mitte der 2000er Jahre ein Scanner der ersten Generation, d. h. Reichweite, Auflösung und Scangeschwindigkeit waren damals sehr begrenzt. Für einen vollen Rundum-Scan mit einer Auflösung von 10 mm @ 100 m hätte das

Instrument ca. 1,5 Stunden gebraucht. Auch die Aufnahme von mehreren Standpunkten garantierte keine sehr dichte Punktwolke, so dass die Objektrekonstruktion durch die Kombination von TLS und Photogrammetrie optimale Auswertungsergebnisse lieferte, da so die Vorteile beider Messverfahren genutzt werden konnten. Durch das Mono-Plotting wurden aus orientierten Fotos und georeferenzierten Punktwolken CAD-Modelle erstellt. Die CAD-Modellierung stellt zwar eine Generalisierung der rekonstruierten Objekte bei der Auswertung dar, jedoch besitzen die erstellten Volumenmodelle durch die topologischen Informationen eine gewisse Intelligenz, die auch wegen der geringen Datenmenge im Vergleich zu Punktwolken oder Dreiecksvermaschungen wichtig für die weitere Verarbeitung bei einer Vielzahl von Anwendungen ist. Softwarepakete für eine kombinierte Auswertung von Punktwolken und Fotos sind Phidias von PhoCAD in Aachen und Z-Map Laser von Menci Software srl in Arezzo, Italien. Der Westerturm von Duderstadt ist ein weiteres Gebäudemodell, das durch die Kombination von TLS und Photogrammetrie aufgenommen und im CAD konstruiert wurde (Kersten et al. 2006). Weitere Gebäudemodelle, die u.a. aus Punktwolken im CAD konstruiert wurden, sind im YouTube Kanal der HCU Hamburg visualisiert:

<https://www.youtube.com/user/HCUHamburgGeomatics>.

Ein anderer Weg als die CAD-Konstruktion stellt die Oberflächenbeschreibung durch eine Dreiecksvermaschung von Punktwolken dar. Im 4. Artikel (Kap. 3.2) „**Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai**“ wurde die Erfassung zahlreicher Moai, die sehr großen vulkanischen Steinfiguren der Osterinsel, durch terrestrisches Laserscanning und die Modellierung durch Dreiecksvermaschung sowie die Texturierung der Modelle beschrieben. Ein weiterer Fokus lag auf der Analyse von Deformationen zwischen zwei sehr nahen Zeitepochen von einem Jahr, in denen aber keine signifikanten Deformationen nachgewiesen werden konnten. Nur eine Veränderung an einem Moai, die durch Vandalismus verursacht wurde, konnte durch den Vergleich von Dreiecksvermaschungen der Scans zweier Epochen eindeutig nachgewiesen werden, da die Veränderungen deutlich über dem Messrauschen des Laserscannings lagen. Gerade derart komplexe Objekte wie die Moai können nur durch eine Dreiecksvermaschung modelliert bzw. geometrisch exakt beschrieben werden, da es wegen der möglichen Anwendungen im Bereich Deformation und Konservierung auch um die detaillierten Bearbeitungsspuren der Figuren geht. Ein großes Problem stellten bei der Aufnahme die Köpfe dar, da diese oberen Bereiche der Köpfe von den Laserscanning-Standpunkten nicht erfasst werden konnten. Heute bietet die Datenerfassung von Unmanned Aerial Vehicles (UAV) mit hochauflösender Kamera oder mit Laserscanner ausgestattet eine gute Option, um diese Bereiche der Köpfe detailliert zu erfassen. Dennoch bot sich das terrestrische Laserscanning Ende der 2000er Jahre als eine effiziente Methode der Datenerfassung an. Heute würden die Steinfiguren eher durch ein kostengünstigeres und flexibel einsetzbares bildbasiertes Verfahren erfasst werden, u. a. auch von UAVs mit entsprechend hochauflösender Kamera für eine optimale Texturierung der Moai. Ein sehr gutes Beispiel für die Modellierung komplexer Geometrie durch Dreiecksvermaschung und einfacher Geometriestrukturen durch geometrische Primitive im CAD zu einem hybriden 3D-Modell stellt das Bismarck-Denkmal in Hamburg dar (Kersten et al. 2010). Bei der Modellierung des Bismarck-Denkmals lag das Augenmerk auf der Datenreduktion, da der Datensatz für die Integration in das Hamburger Stadtmodell so weit wie möglich reduziert werden musste. Somit wurde bei der Datenreduktion durch Polygonddezimierung sowohl die geometrische als auch die visuelle Qualität des Modells in Betracht gezogen. Als Ergebnis konnte eine Reduktion der Daten auf 10% des Ausgangsmodells erzielt werden, ohne dabei Abstriche in der geometrischen und visuellen Qualität des 3D-Modells zu machen, wobei Abweichungen von nur wenigen Millimetern im Vergleich zum Ausgangsmodell registriert werden konnten. Allerdings lagen Abweichungen zur Realität bei schlecht zu definierenden Punkten, die mit einem genauen Referenzmesssystem (Tachymeter) gemessen wurden, von bis zu 10 cm vor. Diese Genauigkeit reichte dennoch für die erforderliche Qualität des Hamburger 3D-Stadtmodells aus.

Um die hohen Anforderungen verschiedener Anwender nach aktuellen, genauen und kompletten Daten zu erfüllen, müssen neue Messmethoden entwickelt werden, die durch eine effiziente Datenerfassung diese Kriterien erfüllen. Dabei spielen Punktwolken aus kinematischen Scans eine wesentliche Rolle, da durch die Datenerfassung aus der Bewegung des Messsystems erheblich mehr Daten in kürzeren Zeiträumen erfasst werden können. Im fünften und sechsten Artikel (Kap. 4.1 und Kap. 4.2.) **„Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning“** und **„Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser“** spielt die kinematische Datenerfassung von 3D-Punktwolken die zentrale Rolle. In dem ersten der beiden Artikel wird ein Multi-Sensor-System der ersten Generation eingesetzt, da sich erst Mitte der 2000er Jahre das kommerzielle kinematische Scanning im Markt etabliert hat. Dabei wurde die erreichte Genauigkeit von ca. 10 cm durch das Messrauschen des IMAGER 5003 und der verwendeten GPS-Lösung, die teilweise in den Gassen von Istanbul keine Ergebnisse liefern konnte, stark beeinflusst. Erst durch die Unterstützung von orientierten Bildsequenzen, die simultan zu dem Scanning aufgenommen wurden, und nachträglich gemessenen zusätzlichen Passpunkten wurde im Postprocessing eine Georeferenzierung der Punktwolken von besser als 10 cm erreicht. Als wesentliche Produkte wurden aus den georeferenzierten Punktwolken Fassadenpläne (Linienkartierung) für Gebäudeensembles im Maßstab 1: 200 abgeleitet, für die eine absolute Punktmessgenauigkeit von 10 cm bei einer Standardabweichung von 0.5 mm im Fassadenplan vorgegeben war. Bei der Zusammenführung unterschiedlicher Daten, nämlich der Fassadenkartierung in terrestrischen Punktwolken und der Kartierung von Dächern in Luftbildern, zur Erstellung von 3D-Gebäudemodellen zeigten sich allerdings 3D-Abweichungen in den Eckpunkten der Gebäude von 18-112 cm, wobei neben der Punktmessgenauigkeit in beiden Datensätzen vor allem die eindeutige Punktidentifizierung ein Problem darstellte. Die Daten der Dächer aus Luftbildern wurden hierbei auf die genaueren Daten vom terrestrischen Laserscanning angepasst. Heute würden sich digitale Schrägluftbilddaufnahmen durch Oblique Aerial Camera Systems für die Auswertung von Dachstrukturen und Hinterhöfen sehr anbieten.

Mit sehr genauen Positionierungssensoren (inertiale Messeinheit, GNSS und exakte Zeitsynchronisierung der Sensoren) und präziser Systemkalibrierung wurde dagegen für das kinematische Scanning auf einem Schiff im Hamburger Hafen eine absolute Punktgenauigkeit von besser als 5 cm erreicht. Das Multi-Sensor System, welches im zweiten Artikel vom Kap. 4 beschrieben wird, besitzt auch eine neuere Generation von Messsensoren (Status 2011). Voraussetzung dafür waren jedoch verschiedene Untersuchungen, um eine sehr präzise Kalibrierung der Positionierungssensoren und des Laserscanners gewährleisten zu können. Dabei wurde sogar ein Fehler in der Firmware des Systemherstellers für das Inertialsystem IXSEA HYDRINS aufgedeckt, der zu einem kleinen Fehler in der Zeitsynchronisierung von +25ms führte. Dieser geringe Fehler in der Zeitsynchronisierung hatte Auswirkungen auf den Rollwinkel des Systems und damit auf die Höheninformation bei Aufnahme des Gebäudes in den höheren Bereichen der Punktwolke. Eine sehr präzise Systemkalibrierung von Multi-Sensor Systemen gewährleistet qualitativ hochwertige Punktwolken (Punktdichte und absolute Genauigkeit) in Kombination mit einer sehr hohen Datenerfassungsrate (Wirtschaftlichkeit). Die Kombination von Laserscanner und Fächerecholot in einem Multi-Sensor System auf einem Schiff ermöglicht sogar die simultane Erfassung von Punktwolken unter und über Wasser, die jedoch eine unterschiedliche Punktdichte und -genauigkeit aufweisen. Da sich das Leistungspotential der Positionierungs- und Messsensorik in Kombination mit den entsprechenden Echtzeit-Auswertelgorithmen in Zukunft noch steigern wird, wird sich die effiziente Datenerfassung durch Multi-Sensor Systeme mit der zu erwartenden hohen Genauigkeit für sehr viele Anwendungen in urbanen Bereichen durchsetzen.

Die bildbasierten Aufnahme- und Auswerteverfahren aus dem Bereich der Computer Vision und Photogrammetrie liefern heute sehr dichte 3D-Punktwolken, die sich hinsichtlich der Qualität bei großen Objekten (Gebäude, Denkmäler) mit den Punktwolken terrestrischer Laserscanner oder der 3D-

Handscanner vergleichen lassen. Hat man bei Punktwolken von terrestrischen Laserscannern zusätzlich für jeden 3D-Punkt einen Intensitätswert, so stehen bei Punktwolken aus bildbasierten Systemen (digitale Spiegelreflex- und Systemkameras) automatisch Farbwerte (RGB) zur Verfügung. In dem siebten und letzten Artikel (Kap. 5) „**Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services**“ wurde anhand verschiedener Beispiele aus den Bereichen Architektur, Denkmalpflege und Archäologie das hohe Leistungspotential der bildbasierten Aufnahme- und Auswerteverfahren für die 3D-Erfassung und Modellierung von Objekten aufgezeigt. Im 3D-Vergleich zu Dreiecksvermaschungen aus Laserscans liegen die durchschnittlichen Abweichungen für eine Gebäudefassade bei ca. 7 mm, während sie bei kleineren Objekten, wie Architekturfragmenten, bei geringer als 1 mm lagen. Bei kleineren archäologischen Fundstücken resultierten die durchschnittlichen Abweichungen zu dem höher wertigen Referenzsystem Streifenprojektionssystem ATOS I 2M in einem Bereich von 0,2-0,3 mm (Kersten et al. 2014). Damit stehen bildbasierte Aufnahme- und Auswerteverfahren als flexible und kostengünstige Alternative gegen über dem Messverfahren mit TLS, 3D-Handscannern und sogar den Streifenprojektionssystemen zur Verfügung.

Dichte Punktwolken verursachen durch die Dreiecksvermaschung auch große Datenmengen, wenn die Daten vorher nicht intelligent gefiltert und zugleich reduziert werden. Daher stellt sich die Frage, in wie weit die Anzahl der Polygone für die Dreiecksvermaschung bei der bildbasierten Modellierung reduzierbar ist, um dennoch visuell qualitative und geometrisch korrekte 3D-Modelle aus den Daten erstellen zu können, die den Qualitätsanforderungen (z. B. Abweichungen kleiner als 1 mm) für den 3D-Druck (Replikate), für die As-Built-Dokumentation und die Visualisierung, gerecht werden. Für Untersuchungen wurde u. a. eine über 2000 Jahre alte Bronzetrommel von Cỗ Loa herangezogen, die mit 165 Fotos (Nikon D800) im Museum der Stadt Hanoi (Vietnam) aufgenommen wurde (Kersten & Lindstaedt 2017b). Zur Beurteilung der erstellten 3D-Modelle wurden mit der Software Geomagic Studio 3D-Vergleiche zwischen den Datensätzen 100% zu 11% und 100% zu 1,2% berechnet, die sehr geringe durchschnittliche Abweichungen von kleiner als 0,1 mm bestätigten (Abb. 6.1). Durch die gewählte Farbskala, in der alle Abweichungen unter 0,1 mm in Grün dargestellt sind, wird dokumentiert, dass es kaum Abweichungen zwischen den Datensätzen gibt. Die Reduktion der Polygone erfolgte krümmungsbasiert, d.h. Regionen mit hoher Krümmung wurden weniger reduziert. Die erreichten Datenreduktionen um die Faktoren 1:9 und 1:83 sind signifikant (Tab. 6.2).

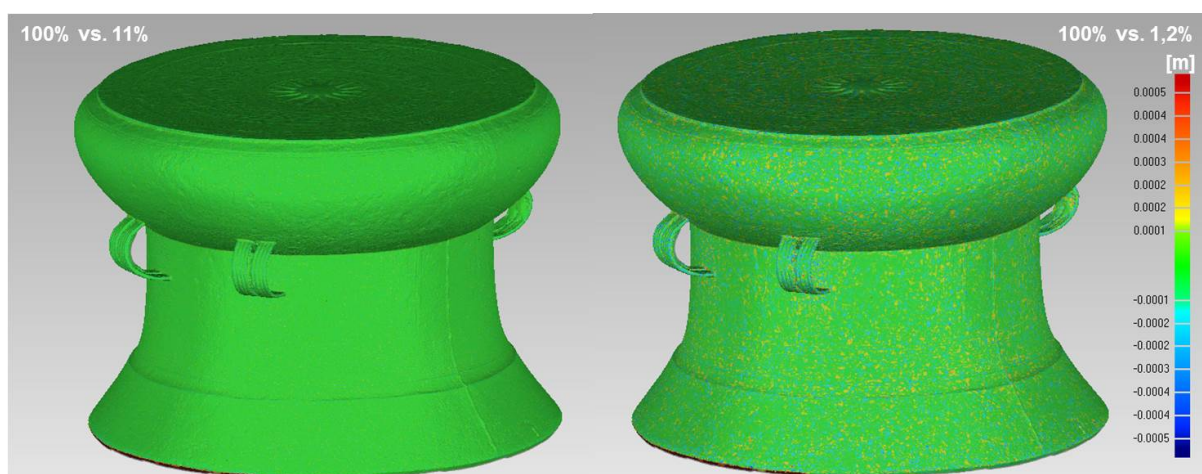


Abb. 6.1: 3D-Vergleich zwischen hochauflösenden (100%) und reduzierten Datensätzen (11% und 1,2%) der Cỗ Loa Bronzetrommel (Einheit Farbskala in [m]).

Tab. 6.2. Auflösung und Datenmengen für die Cỗ Loa Bronzetrömmel im Vergleich (Kersten & Lindstaedt 2017b)

Auflösung	Datensatz	# Dreiecke	# MByte	Reduktionsfaktor
Hoch	100,0%	8.501.538	940,0	1
Niedrig	11,0%	945.093	99,7	9
Sehr niedrig	1,2%	100.000	12,4	83

Der Arbeitsablauf von der Objektaufnahme über den Datenimport, den Bildorientierungen und der Kamerakalibrierung, der Berechnung der dichten Punktwolke, der Dreiecksvermaschung und der Texturierung läuft in der Software Agisoft PhotoScan weitestgehend automatisch ab. Lediglich die Bildmessungen von signalisierten Passpunkten und/oder Maßstäben sowie die Segmentierung und Filterung der Punktwolke erfolgt noch mit geringem manuellem Eingriff durch den Operateur. Damit steht eine sehr effiziente und kostengünstige Methode zur 3D-Objekterfassung und Modellierung zur Verfügung. Neben den bereits erwähnten Softwarepaketen Agisoft PhotoScan und Pix4Dmapper drängen auch andere Softwarelösungen wie SURE von nframes (<http://www.nframes.com/>), aSPECT 3D von Arctron (<http://aspect.arctron.de/de/>) und RealityCapture von Capturing Reality (<https://www.capturingreality.com/>) im Bereich der bildbasierten Aufnahme- und Auswerteverfahren auf dem Markt. Sie stehen nun damit in Konkurrenz zum terrestrischen Laserscanning und artverwandten Aufnahmeverfahren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass heute durch das terrestrische Laserscanning, ob im statischen oder kinematischen Modus, 3D-Punktwolken generiert werden können, die je nach Entfernung zum Objekt unter guten Bedingungen eine absolute 3D-Punktgenauigkeit von einem Zentimeter oder besser erreichen. 3D-Handscanner ergänzen das TLS sehr gut, um Zwischenräume oder sehr beengte Räume (z. B. Abstellkammern oder Toiletten) mit einer 3D-Punktgenauigkeit von wenigen Millimetern oder besser aufzunehmen. Dabei wird vorausgesetzt, dass diese Systeme vorab kalibriert sind und somit Maßstabsprobleme durch eine mögliche instabile Bauweise kompensieren können. High-end handgeführte 3D-Scanner wie der Creaform HandySCAN 700 erreichen 3D-Punktgenauigkeiten von besser als 30 Mikrometer, was sogar für viele Anwendungen in der Industrie (Reverse Engineering, Prototyping, Qualitätskontrollen in der Fertigung, etc.) ausreicht. Bei photogrammetrischen Verfahren, die mit Bildsequenzen arbeiten, hängt die 3D-Punktgenauigkeit vom Bildmaßstab, von der Auflösung und der geometrischen Stabilität der verwendeten Kameras und vom Oberflächenmaterial und -farbe ab. Die Genauigkeiten des terrestrischen Laserscannings bei großen Objekten, wie Gebäude und sogar fast von Streifenprojektionssystemen bei kleineren Objekten, sind mit diesen Verfahren erreichbar.

Aus den hohen Genauigkeiten, die mit den verschiedenen Aufnahmeverfahren erzielt werden können, ist es leider nicht immer möglich, die gleiche Genauigkeit für die Objektrekonstruktion aus Punktwolken abzuleiten. Je nach Modellierungsart (CAD/Engineering Modelling oder Dreiecksvermaschung/Mesh Modelling) werden weitere Fehler bei der Objektrekonstruktion hinzukommen. Grundsätzlich wird die Genauigkeit durch das geforderte Endergebnis festgelegt. Dementsprechend werden die Aufnahmeparameter für das einzusetzende Messverfahren festgelegt. Welche Aufgabe und welche Anforderungen müssen erfüllt werden? a) Bei der As-Built-Dokumentation sind die exakten Maße mit einer hohen Genauigkeit gefragt, b) beim Bauaufmaß bzw. bei 2D-Plänen für Architekten, Denkmalpfleger und Bauforscher richtet sich die Genauigkeit nach den Genauigkeitsstufen I-IV gemäß Eckstein (1999) (Tab. 6.2), die sich heute manchmal noch nach dem Plot-Maßstab der 2D-Pläne richten, c) bei 3D-Gebäudemodellen sind auch für die Integration in ein Stadtmodell eher geringe Datenmengen mit einer geringer Genauigkeit (± 10 cm) gefragt und d) für die Visualisierung von entsprechend großen und kleinen Objekten spielt eine hohe Genauigkeit keine große Rolle, auch wenn Objektdetails erwünscht sind.

Wie bereits erwähnt erfolgt bei der CAD-Modellierung oft eine Generalisierung der konstruierten Daten, um geringe Datenmengen zu produzieren, d. h. Gebäude werden z. B. rechtwinklig konstruiert und gekrümmte Flächen werden eingeebnet, während bei der Dreiecksvermaschung eine exakte Oberflächenbeschreibung je nach Punktdichte und Messrauschen oft auch mit dem Nachteil erhöhter Datenmengen erfolgt.

Tabelle 6.2: Genauigkeitsstufen für das Bauaufmaß nach Eckstein (1999), Zusammenstellung übernommen aus <https://de.wikipedia.org/wiki/Bauaufmaß>.

Genauigkeitsstufe	Inhalt	Maßstab	Messgenauigkeit
I	Schematisches Aufmaß ohne hohe Anforderungen an die maßliche Genauigkeit und ohne Darstellung von Bauschäden /Verformungen; auch als ungefähr maßstäbliche Freihandzeichnung.	1:100	ungefähre Maßstäblichkeit
II	Annähernd wirklichkeitsgetreues Aufmaß einschließlich richtig proportionierter Darstellung des konstruktiven Aufbaus sowie grober Verformungen.	1:50 oder 1:100	± 10 cm bezogen auf das Gesamtgebäude
III	Verformungsgetreues Aufmaß einschließlich Erfassung von Bauschäden sowie Spuren früherer Bauzustände (z. B. vermauerte Öffnungen, Reste von Gewölbeansätzen etc.).	1:50	± 2,5 cm
IV	Verformungsgetreues Aufmaß mit detaillierter Darstellung einschließlich Erfassung kleinster Details (in der Regel für hochwertige Denkmalobjekte und wissenschaftliche Bauforschung).	1:25 oder größer	± 2 cm oder genauer, je nach Maßstab

3D-Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning und aus bildbasierten Verfahren bilden heute die Grundlage für viele 3D-Objektmodellierungen im CAD. Auch für Virtual Reality Anwendungen steigt zukünftig die Nachfrage nach texturierten 3D-Modellen, die aus Punktwolken terrestrischer Laserscanner oder bildbasierter Verfahren generiert werden können. Aus den Punktwolken werden CAD-Volumenmodelle konstruiert, die anschließend in einer Visualisierungssoftware wie 3D Studio Max texturiert werden, um sie dann in eine Game Engine zu transferieren. In der Game Engine können die Modelle als immersives Erlebnis mit einer VR-Brille, wie der neuen HTC Vive, in 3D angeschaut und sich entsprechend in den Daten bewegt bzw. navigiert werden. Erste VR-Anwendungen, in denen sich ein oder mehrere Besucher gleichzeitig in Modellen navigieren können, wurden an der HafenCity Universität Hamburg bereits aus Punktwolken erstellt. Dazu gehören das Virtuelle Museum des Alt-Segeberger Bürgerhauses von innen und außen (Kersten et al. 2017b), die Selimiye Moschee in Edirne von innen und außen (Kersten et al. 2017a) sowie das Holzmodell des Salomonischen Tempels aus dem Museum für Hamburgische Geschichte konstruiert (Kersten et al. 2017c).

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Innovationen und technologischen Entwicklungen bei der Hardware terrestrischer Laserscanner und 3D-Handscanner rasant weitergehen. Terrestrische Laserscanner haben sich zu Multi-Sensor Systemen entwickelt. Die Entwicklungen in der Software kommen jedoch den technischen Systementwicklungen nur sehr langsam hinterher, d.h. vollautomatische Aufnahme und Auswertung auf Knopfdruck sind für den gesamten Workflow bis zu einem CAD-Endprodukt heute immer noch nicht realisiert, da die Objekte vielfach zu komplex sind. Die bildbasierten Verfahren erfordern heute immer noch Expertenwissen bei der Sensorwahl, Aufnahmekonfiguration und Systemkalibrierung, wenn man qualitativ hochwertige Resultate bzw. Produkte erzeugen möchte. Hier ist die Diskrepanz zwischen Hardware- und Softwareentwicklung nicht ganz so groß wie bei den scannenden Systemen, da die Softwareentwicklung in den letzten Jahren gegenüber einer eher stagnierenden Kameraentwicklung deutlich aufgeholt hat. Dennoch wird es nach Auffassung des Verfassers in den nächsten zehn Jahren keine Lösungen geben, die eine automatische Generierung von CAD-basierten 3D-Volumenmodellen aus 3D-Punktwolken ermöglichen.

7. Literatur

- Ackermann, F., 1995. Digitale Photogrammetrie – ein Paradigma-Sprung. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 63(3), 106-115.
- Ackermann, F., 1999. Airborne Laser Scanning - Present Status and Future Expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 64-67.
- Agouris, P., Stallman, D. & Li, H., 1994. Semi-Automated Monoplotting on a Digital Photogrammetric Station. *The International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 30, 146-154.
- Arikan, M., Schwärzler, M., Flöry, S., Wimmer, M. & Maierhofer, S., 2013. O-Snap: Optimization-Based Snapping for Modeling Architecture. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(1), 6.
- Balzani, M., Pellegrinelli, A., Perfetti, N. & Ucceli, F., 2002. A terrestrial 3d laser scanner - accuracy tests. *The International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/C7), 445-453.
- Becker, R., Benning, W. & Effkemann, C., 2004. 3D Monoplotting, Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 347-355.
- Becker, S. & Haala, N., 2008. Integrated LIDAR and Image Processing for the Modelling of Building Facades. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, (2), 65-81.
- Böder, V., Kersten, Th., Hesse, C., Thies, Th., Ehm, M. & Sauer, A., 2010. Scannen unter und über Wasser durch Sensorintegration von GNSS/IMU, Echolot und terrestrischem Laserscanner. *GNSS 2010 - Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert – Beiträge zum 100. DVW-Seminar am 4. und 5. Oktober 2010 in Köln, Schriftenreihe des DVW, Band 63, Wißner-Verlag, Augsburg*, 193-212.
- Boehler, W., Vicent, M. B. & Marbs, A., 2003. Investigating laser scanner accuracy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5), 696-701.
- Boehler, W. & Marbs, A., 2004. Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage, Luhmann, Th. (Hrsg.), Wichmann, Heidelberg*, 82-89.
- Brenner, C., 2007. Interpretation terrestrischer Scandaten. 74. DVW-Seminar Terrestrisches-Laser-Scanning (TLS 2007), *DVW-Schriftenreihe Band 53*, 59-80.
- Brenner, C. & Dold, C., 2007. Automatic relative orientation of terrestrial laser scans using planar structures and angle constraints. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3/W52), 84-89.
- Brenner, C. & Haala, N., 1998. Fast production of virtual reality city models. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(4), 77-84.
- Briese, C., 2004. Three-dimensional Modelling of Breaklines from Airborne Laser Scanner Data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B3), 1097-1102.
- Briese, C., 2006. Structure line modelling based on terrestrial laser scanner data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36(5).
- Brown, D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), 855-866.
- Brügelmann, R., 2000. Automatic Breakline Detection from Airborne Laser Range Data. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38(B3), 109-116.

- Chan, T., Lichti, D., Belton, D., Klingseisen, B. & Helmholz, P. 2016. Survey Accuracy Analysis of a Hand-held Mobile LiDAR Device for Cultural Heritage Documentation. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, (3), 153-165.
- Clark, J. & Robson, S., 2004: Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surface of known colour. *The International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4).
- Delaunay, B., 1934. Sur la sphère vide. *Bull. Acad. Science USSR, VII: Class. Sci. Mat. Nat.* 793-800.
- DVW, 2014. Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, Band 75, Wißner-Verlag, 196 S.
- Eckstein, G., 1999. Empfehlungen für Baudokumentationen. Arbeitsheft 7, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.), Stuttgart.
- Erić, V., Göring, M. & Luhmann, T., 2017. Intensity of the Terrestrial Laser Scanning Data: Incident Angle and Surface Reflectance Effects. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*, Th. Luhmann/Ch. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 40-49.
- Fischler, M. A. & Bolles, R. C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.
- Fritsch, D., 2014. Mobile Mapping – Eine Revolution im Vermessungswesen. Stiftung Bauwesen, Stuttgart, Vorträge 22.11.2013
- Fritsch, D., 2015. Punktwolken, und was dann? *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 1, 54-66.
- Gerdau, O., 2015: 3D-CAD-Modellierung des Seedorfer Torhauses in bild-basierten Punktwolken aus UAV-gestützter Bildaufnahme. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Bachelorstudiengang Geomatik, HafenCity Universität Hamburg, 89 S.
- Gordon, B., 2008a: Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1206/1/Dissertation_BGordon.pdf.
- Gordon, B., 2008b. Diskussion von Feldprüfverfahren zur Messunsicherheitsbestimmung für terrestrische Laserscanner. *Schriftenreihe des DVW*, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, 125-142.
- Gottwald, R., 2008. Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) – A contribution to a future ISO standard. FIG Working Week, Stockholm, Sweden 14–19 June 2008. www.fig.net/pub/fig2008/papers/ts02d/ts02d_02_gottwald_2740.pdf
- Gottwald, R., Heister, H. & Staiger, R., 2009. Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2, 88-96.
- Haala, N. & Brenner, C., 1997. Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. *Proceedings EARSEL Workshop on LIDAR remote sensing on land and sea*, Tallinn/Estonia.
- Heister, H., 2006. Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). *Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006)*, Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, 35-44.
- Henricsson, O., Bignone, F., Willuhn, W., Ade, F., Kübler, O., Baltsavias, E., Mason, S. & Grün, A., 1996. Project AMOBE: Strategies, current status, and future work. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 321-330.

- Hirschmüller, H. 2005. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2, 807-814.
- Holst, C., Schmitz, B. & Kuhlmann, H., 2016. TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. Terrestrisches Laserscanning (TLS 2016), Schriftenreihe des DVW, Band 85, C. Holst (Ed.), Wißner-Verlag, Augsburg, 39-58.
- Hough, P. V. C., 1962. Method and Means for Recognizing Complex Patterns. U.S. Pat. 3069654.
- Huxhagen, U., Kern, F. & Siegrist, B., 2009. Vorschlag für eine TLS-Prüfrichtlinie. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Luhmann, T. & Müller, Ch. (Hrsg.), Heidelberg, Wichmann, 4-12.
- Ingensand, H., 2006. Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden, Austria, Vol. 2224.
- James, M. R. & Quinton, J. N., 2014. Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: the hand-held mobile laser scanner (HMLS). Earth surface processes and landforms, 39(1), 138-142.
- Kern, F. (2002): Marktübersicht -Terrestrische 3D-Laserscanner.
<http://www.xdesy.de/scanner/marktuebersicht.html>, (zuletzt besucht am 16.11.2016)
- Kern, F., 2008. Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. Optische 3D-Messtechnik, Photogrammetrie, Laserscanning, Th. Luhmann & Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, Heidelberg, 306-316.
- Kern, F. & Huxhagen, U., 2008. Ansätze zur systematischen Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern. Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008), Schriftenreihe des DVW, Band 54, W. Niemeier & M. Schäfer (Ed.), Wißner-Verlag, Augsburg, 111-124.
- Kersten, Th. & Acevedo Pardo, C., 2003. Wie kommt das Ahrensburger Schloss in den Computer? - 3D-Gebäudeerfassung und Visualisierung durch digitale Photogrammetrie. DenkMal! Schleswig Holstein, Zeitschrift für Denkmalpflege in Schleswig Holstein, Landesamt für Denkmalpflege in Schleswig-Holstein (Hrsg.), Jahrgang 10, 2003, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 48-54.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M., 2012. Virtual Architectural 3D Model of the Imperial Cathedral (Kaiserdom) of Königs-Lutter, Germany through Terrestrial Laser Scanning. EuroMed 2012 - Int. Conference on Cultural Heritage, M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino, R. Caffo, R. (Eds.), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volume 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 201-210.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M., 2017a. Photogrammetrie auf Knopfdruck - Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 142(1), 3-13.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M., 2017b. Mit Kamera, Maßstab und Laptop – Best Practice zur Erstellung von 3D-Modellen für eine Museumsausstellung am Beispiel vietnamesischer Kulturobjekte. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 26, Tagungsband der 37. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF (auf CD), 8.-10. März 2017 in Würzburg, 35-44.
- Kersten, Th., Acevedo Pardo, C. & Lindstaedt, M., 2004a. 3D Acquisition, Modelling and Visualization of north German Castles by Digital Architectural Photogrammetry. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B2), 126-132.
- Kersten, Th., Biebermann, M. & Schneider, M., 2006. 3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und ter-

restrischem Laserscanning. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Th. Luhmann & C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 254-263.

Kersten, Th., Böder, V. & Schmidt, F., 2013. Shipborne Scanning – Simultane 3D-Vermessung des Flussbettes und der Uferbereiche am Hochrhein durch Bathymetrie und mobiles Laserscanning. Geomatik Schweiz, 5/2013, 243-246.

Kersten, Th., Büyüksalih, G., Tschirschwitz, F., Kan, T., Deggim, S., Kaya, Y. & Baskaraca, A. P., 2017a. The Selimiye Mosque of Edirne, Turkey - An Immersive and Interactive Virtual Reality Experience using HTC Vive. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(5/W1), GEOMATICS & RESTORATION – Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, 22–24 May 2017, Florence, Italy, G. Tucci & V. Bonora (eds.), 403-409.

Kersten, Th., Eilmus, B., Lindstaedt, M. & Acevedo Pardo, C., 2003. 3D-Erfassung und Visualisierung des Celler Schlosses durch digitale Architekturphotogrammetrie. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 213-222.

Kersten, Th., Hinrichsen, N., Lindstaedt, M., Weber, C., Schreyer, K. & Tschirschwitz, F., 2015b. Baugeschichtliche 3D-Dokumentation des Alt-Segeberger Bürgerhauses durch Photogrammetrie und Terrestrisches Laserscanning. Tagungsband der Denkmäler3.de 2013 - Von low-cost bis high-tech: 3D-Dokumentation in Archäologie & Denkmalpflege, H.-J. Przybilla, T. Kersten & F. Boochs (Hrsg.), LWL Industriemuseum Zeche Zollern Dortmund, 16.-18. Oktober 2013, 30-37.

Kersten, Th., Lindstaedt, M., Maziull, L., Schreyer, K., Tschirschwitz, F. & Holm, K., 2015c. 3D Recording, Modelling and Visualisation of the Fortification Kristiansten in Trondheim (Norway) by Photogrammetric Methods and Terrestrial Laser Scanning in the Framework of ERASMUS Programmes. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(5/W4), D. Gonzalez-Aguilera, F. Remondino, J. Boehm, T. Kersten & T. Fuse (eds.), 6th International Workshop 3D-ARCH 2015: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 25-27 February 2015, Avila, Spain.

Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M. & Sternberg, H., 2008. Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. FIG Working Week 2008 - Integrating Generations, Stockholm, Sweden, June 14-19.

Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F., Schreyer, K. & Maziull, L., 2014. Bildbasierte Low-Cost Systeme zur automatischen Generierung von 3D-Modellen archäologischer Fundstücke in Äthiopien und Katar. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014, Th. Luhmann & Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 210-222.

Kersten, Th., Mechelke, K. & Maziull, L., 2015a. 3D Model of Al Zubarah Fortress in Qatar - Terrestrial Laser Scanning vs. Dense Image Matching. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(5/W4), D. Gonzalez-Aguilera, F. Remondino, J. Boehm, T. Kersten & T. Fuse (eds.), 6th International Workshop 3D-ARCH 2015: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 25-27 February 2015, Avila, Spain.

Kersten, Th., Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F. & Misgaiski-Hass, M., 2016. Genauigkeitsuntersuchungen handgeführter Scannersysteme. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 25, Tagungsband der 36. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF (auf CD), Dreiländertagung vom 7.-9. Juni 2016 in Bern, 271-287.

- Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K. & Acevedo Pardo, C., 2004b. Terrestrial laser scanning system Mensi GS100/GS200 - Accuracy tests, experiences and projects at the Hamburg University of Applied Sciences. The International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(5/W16), Proceedings of the ISPRS working group V/1 'Panoramic Photogrammetry Workshop', H.-G. Maas & D. Schneider (eds.), Dresden, Germany, February 19-22.
- Kersten, Th., Tilsner, A., Jaquemotte, I. & Sieh, W., 2010. 3D-Erfassung und Modellierung des Bismarck-Denkmal durch terrestrisches Laserscanning zur Integration in das Hamburger Stadtmodell. AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, (5), 163-169.
- Kersten, Th., Tschirschwitz, F. & Deggim, S., 2017b. Development of a Virtual Museum including a 4D Presentation of Building History in Virtual Reality. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W3, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 1-3 March 2017, Nafplio, Greece, Editor(s): D. Aguilera, A. Georgopoulos, T. Kersten, F. Remondino, and E. Stathopoulou, 361-367.
- Kersten, T., Tschirschwitz, F., Lindstaedt, M., Deggim, S., 2017c. The Historic Wooden Model of Solomon's Temple – 3D Recording, Modelling and Immersive Virtual Reality Visualisation. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, special issue, in print.
- Kraus, K., 2003. Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Bulletin-Association pour l'électrotechnique les technologies de l'énergie et de l'information, 19-22, https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_120149.pdf, zuletzt aufgerufen 24.11.2017
- Läbe, T. & Gülch, E., 1998. Robust techniques for estimating parameters of 3D building primitives. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(4).
- Lambertus, T., Belton, D. & Helmholz, P., 2017. Empirical investigation of a stochastic model based on intensity values for terrestrial laser scanning. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Th. Luhmann & Ch. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 27-39.
- Lee, D. T. & Schachter, B. J., 1980. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. International Journal of Computer & Information Sciences, 9(3), 219-242.
- Leica Geosystems AG, 2017. Leica BLK360 Imaging Scanner - BLK360 Product Specifications. https://lasers.leica-geosystems.com/sites/default/files/leica_media/product_documents/blk360/prod_docs_blk360/leica_blk360_spec_sheet.pdf, zuletzt aufgerufen 05.08.2017.
- Lemmens, M. 2007. Terrestrial Laser Scanners. GIM International, 21(9), 41-45.
- Lichti, D.D., Stewart, M.P., Tsakiri, M. & Snow, A.J., 2000: Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B5), 485-492.
- Lindenberger, J., 1993. Laser-Profilmessungen zur Topographischen Geländeaufnahme. DGK-Reihe C, Nr. 400, München.
- Lindstaedt, M., Kersten, Th., 2005. Ein virtueller Klon für Helgolands Lange Anna durch terrestrisches Laserscanning. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 216-223.
- Lindstaedt, M., Graeger, T., Mechelke, K. & Kersten, Th., 2011. Terrestrische Laserscanner im Prüfstand – Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-400, Leica C10 und Faro Photon 120. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Th. Luhmann & Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 4-14.

- Lindstaedt, M., Kersten, Th., Mechelke, K. & Graeger, T., 2012. Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Th. Luhmann & Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 264-275.
- Lindstaedt, M., Kersten, Th., Mechelke, K., Graeger, T. & Sternberg, H., 2009. Phasen im Vergleich - Erste Untersuchungsergebnisse der Phasenvergleichsscanner FARO Photon und Trimble FX. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Th. Luhmann & Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 53-64.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J., 2014. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 2nd ed., Walter de Gruyter, Berlin, 684 S.
- Luhmann, T., Fraser, C. & Maas, H.-G., 2015. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 37-46.
- Maas, H.-G., 1999. Fast determination of parametric house models from dense airborne laserscanner data. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(2W1), International Workshop on Mobile Mapping Technology, Bangkok.
- Maas, H.-G., 2001. The suitability of Airborne Laser Scanner Data for Automatic 3D Object Reconstruction. Third International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 10.-15. June 2001, Ascona, Switzerland.
- Mandlbürger, G., Hollaus, M., Glira, P., Wieser, M., Milenkovic, M., Riegl, U. & Pfennigbauer, M., 2015. First examples from the RIEGL VUX-SYS for forestry applications. Proceedings of SilviLaser 2015, La Grande Motte, France, 105-107.
- Maziull, L., 2010. 3D-Erfassung und Modellierung des Neuwerker Leuchtturms durch Kombination von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Bachelorstudiengang Geomatik, HafenCity Universität Hamburg, 80 S.
- McCallum, B. C., Fright, W. R., Nixon, M. A. & Price, N. B., 1996. A feasibility study of hand-held laser surface scanning. Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand, 103-108.
- Mechelke, K., Kersten, Th. & Lindstaedt, M., 2007. Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, A. Gruen & H. Kahmen (eds.), Zurich, July 9-12, Vol. I, 319-327.
- Mucke, J., 2002. Zur Leistungsfähigkeit des Lasermesssystems Callidus. Photogrammetrie und Laserscanning: Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 84-92.
- Mulsow, C., Schneider, D., Ullrich, A. & Studnicka, N. 2004. Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Luhmann, T. (Hrsg.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 108-113.
- Neitzel, F. & Gordon, B., 2013. Zum DVW-Merkblatt „Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern“. Schriftenreihe des DVW, Band 72, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Neitzel, F., Gordon, B., & Wujanz, D., 2014. Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW Merkblatt, 7-2014.
http://www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2015/07_DVW-Merkblatt_TLS_Ueberpr%C3%BCfung.zip (19.02.2017)

- Peipe, J. & Schneider, C. T., 2003. CCD oder CMOS-ein Praxisbericht. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, (5), 423-428.
- Piatti, D. & Rinaudo, F., 2012. SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) Cameras: Tests and Comparison. *Remote Sensing* 2012, 4(4), 1069-1089.
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, Th. & Troisi, S., 2012. Low-cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – a Critical Overview. *EuroMed 2012 - Int. Conference on Cultural Heritage*, Ioannides, M.; Fritsch, D.; Leissner, J.; Davies, R.; Remondino, F.; Caffo, R. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Volume 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 40-54.
- Remondino, F. & Stoppa, D., 2013. *TOF Range-Imaging Cameras*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 240 S.
- Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F. & Nex, F., 2014. State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), 144-166, DOI: 10.1111/phor.12063
- Reshetyuk, Y., 2006. Calibration of terrestrial laser scanners callidus 1.1, Leica HDS 3000 and Leica HDS 2500. *Survey Review*, 38(302), 703-713.
- Reshetyuk, Y., 2009. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis, School of Architecture and the Built Environment (ABE), Transport and Economics, Geodesy, KTH Stockholm, Sweden.
- Ressl, C., Haring, A., Briese, Ch. & Rottensteiner, F., 2006. A Concept for Adaptive Mono-Plotting Using Images and Laserscanner Data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3).
- Rottensteiner, F. & Briese, C., 2004. Automatische Erfassung von Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und die Integration von Luftbildern. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, (4), 269-278.
- Schneider, D. 2006. Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. *Proceedings of 3rd IAG Sympoisum on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering & 12th FIG Symposium on Deformation Measurement*, H. Kahmen & A. Chrzanowski (eds.), Baden (Austria).
- Schneider, D. 2009. Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 177-182.
- Schulz, T. & Ingensand, H., 2004. Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 90-97.
- Schwalbe, E., Hofmann, A. D. & Maas, H. G., 2004. Gebäudemodellierung in reduzierten Parameter-räumen von Flugzeug-Laserscannerdaten. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, (4), 307-314.
- Schwarz, W., 2017. *Ingenieurgeodäsie. Handbuch der Geodäsie*, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel, Springer Berlin, 610 S.
- Stadt Halle, 2002: Pfiffiger Laser aus Halle scannt die Welt ein (24.04.2002). <http://www.halle.de/de/Verwaltung/Presseanfragen/Nachrichten/?NewsID=2404> (zuletzt besucht am 06.11.2016).

Staiger, R. & Ettel, M., 2003. Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Band 12, 293-300.

Staiger, R., 2005. The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). From Pharaohs to Geomatics. FIG Working Week, 16-21.

Sternberg, H., Kersten, Th. & Conseil, N., 2005. Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 - Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 56-65.

Waldhäusl, P. & Hochstöger, F., 1990. Monoplotting: Einzelbildauswertung für die Beobachtung von Veränderungen auf der Geländeoberfläche. VI. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Institut für Geodäsie, Innsbruck, 137-154.

Wehmann, W., Van Zyl, C., Kramer, H., Widger, D. & Zimmermann, R., 2007. Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma RIEGL in diesem Testfeld. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 132(3), 175-180.

Wenzel, K., Rothermel, M., Haala, N. & Fritsch, D., 2013. SURE—The ifp software for dense image matching. Photogrammetric Week, Vol. 13, 59-70.

Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M. & Neitzel, F., 2017a. An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 125, 146-155.

Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., Neitzel, F., Tschirschwitz, F. & Kersten, Th., 2017b. Ein intensitätsbasiertes stochastisches Modell für terrestrische Laserscanner – erste Untersuchungen der Z+F IMAGER 5006h und 5010. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Th. Luhmann/Ch. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 16-26.

Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T. & Reidl, F., 2013. Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner – Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, 20(02).

Zámečnicková, M. & Neuner, H. 2014. Der Einfluss des Auftreffwinkels auf die reflektorlose Distanzmessung. Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda, Schriftenreihe des DVW, Band 78, 69-85.